

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

## **Fakulta strojní**

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

**Sledování plynatosti a dilatace sádrových směsí**

**Observing the flatulence and the dilatation of the plaster mixtures**

Čeněk Faiř  
KSP- SM - 556

Vedoucí diplomové práce: Prof.Ing. Iva Nová CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Machuta, Ph.D.

### Rozsah práce a příloh

Počet stran: 62

Počet tabulek: 8

Počet obrázků: 25

**Vložit list**

**ANOTACE**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: **M2301- Strojní inženýrství**

Diplomant: **Čeněk Faifr**

Téma práce: **Sledování plynatosti a dilatace sádrových směsí**

**Observing the flatulence and the dilatation of the plaster mixtures**

Číslo DP: **KSP-SM-556**

Konzultant: **Ing. Jiří Machuta Ph.D.**

Cílem diplomové práce bylo sledovat dilatační změny sádrových formovacích směsí.

Abstrakt:

Tato diplomová práce je zaměřena na sledování plynatosti a teplotní dilatace sádrových směsí. Práce je rozdělena do dvou základních kapitol na teoretickou a experimentální část. V teoretické části je popsána základní charakteristika slévárenských forem, obecná charakteristika formovacích směsí a jejich plynotvornost. Dále je práce zaměřena na obecnou charakteristiku sádry a sádrových forem, a teplotní roztažnost pevných látek.

V experimentální části je uveden popis měřících zařízení, postup a výroba vzorků potřebných pro měření. Je zde popsán měřicí postup a následné vyhodnocení výsledků.

Abstract:

This thesis focuses on the observation of flatulence and thermal dilatation of plaster mixtures. It is divided in two basic parts – theoretical and experimental part. The theoretical part describes basic characteristics of casting moulds, general characteristics of shaping mixtures and their flatulence. Further on the work deals with general characteristics of plaster, plaster forms and thermal expansivity of solid substances.

The experimental part of work provides description of measuring devices and a procedure of production of samples needed for measurement. It also describes the measuring procedure and the subsequent results evaluation.

### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 27.5.2011

.....

Čeněk Faiř  
Pod Horama 319  
50791 Stará Paka

Poděkování:

Děkuji paní prof. Ing. Ivě Nové CSc. především za trpělivost, rady a věnovaný čas při psaní této diplomové práce. Dále děkuji garantovi diplomové práce Ing. Jiřímu Machutovi Ph.D.. Poděkování patří rodičům za podporu při studiu, přítelkyni Míše Ostenové a všem přátelům, co mi pomáhali a byli pro mě oporou.

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a zkratek .....</b>	<b>9</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
1.1 Základní charakteristika slévárenských forem.....	11
1.1.1 <i>Formovací směsi</i> .....	12
1.1.2 <i>Vlastnosti za syrova</i> .....	13
1.1.3 <i>Vlastnosti směsí po vysušení nebo po chemickém zpevnění</i> .....	14
1.1.4 <i>Vlastnosti směsí za vysokých teplot</i> .....	15
1.2 Ostřivo a pojivo.....	16
1.2.1 <i>Pojiva první generace</i> .....	18
1.2.2 <i>Pojiva druhé generace</i> .....	18
1.2.3 <i>Pojiva třetí generace</i> .....	20
1.2.4 <i>Pojiva čtvrté generace</i> .....	20
1.3 Sádra a sádrové formovací směsi .....	20
1.3.1 <i>Výroba sádry</i> .....	21
1.3.2 <i>Tuhnutí sádrových pojiv</i> .....	25
1.3.3 <i>Formy ze sádrových směsí</i> .....	26
1.3.4 <i>Výroba forem ze sádrových směsí</i> .....	26
1.3.5 <i>Způsob výroby sádrových forem</i> .....	28
1.3.6 <i>Vliv tepelného zpracování na vlastnosti sádrových forem</i> .....	30
1.3.7 <i>Použití forem ze sádrových směsí</i> .....	30
1.4 Teplotní roztažnost (dilatometrie) pevných látek.....	30
1.5 Plynotvornost formovacích směsí.....	31
1.5.1 <i>Metody sledování plynatosti</i> .....	32
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....</b>	<b>34</b>
2.1 Charakteristika měřicího zařízení pro měření dilatace .....	34
2.1.1 <i>Popis jednotlivých součástí měřicího zařízení</i> .....	35
2.2 Způsob výroby vzorků sádrových formovacích směsí.....	36
2.3 Popis postupu při měření dilatace .....	38
2.4 Způsob zpracování naměřených hodnot .....	39

2.5	Grafické znázornění průměrných hodnot dilatace v závislosti na teplotě vzorku všech skupin směsí .....	42
2.6	Vypočítané součinitele teplotní roztažnosti .....	44
2.7	Vyhodnocení dílčích měření .....	45
2.8	Sledování plynatosti sádry.....	46
2.8.1	<i>Charakteristika měřícího zařízení .....</i>	<i>46</i>
2.8.2	<i>Výroba vzorků a postup měření plynatosti vybraných směsí .....</i>	<i>49</i>
2.9	Vyhodnocení záznamů plynatosti.....	50
<b>3</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>55</b>
3.1	Diskuse výsledků z měření dilatací formovacích směsí .....	55
3.2	Diskuse výsledků plynatosti u různých koncentrací sádrových vzorků .....	55
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>58</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>62</b>



## Seznam použitých symbolů a zkratk

$U$	elektrické napětí	[V]
$T_1$	teplota okolí vzorku	[°C]
$T_2$	teplota vzorku	[°C]
$\delta$	hodnota dilatace	[ $\mu\text{m}$ ]
$\Delta U$	rozdíl elektrického napětí	[V]
$U_2$	výchozí hodnota napětí	[V]
$U_1$	počáteční hodnota napětí	[V]
$l$	původní délka vzorku	[ $\mu\text{m}$ ]
$a$	součinitel teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$l_o$	délka počáteční	[ $\mu\text{m}$ ]
$T$	teplota při dané dilataci	[°C]
$T_o$	předchozí teplota	[°C]
$V_m$	molový objem plynu	[m <sup>3</sup> /kmol]
$M$	hmotnost $\text{CaCO}_3$	[g]

## ÚVOD

V oblasti strojírenství je slévárenství důležitým a potřebným odvětvím, na které následně navazují technologické postupy nutné k finalizaci výrobků s co nejširším využitím. Předpokladem výroby kvalitních odlitků je znalost nejen výroby slévárenských formovacích směsí, jader a forem, ale také znalosti materiálů určených ke slévání a jejich metalurgie. Nejen touto problematikou se již desítky let zabývají na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci.

Za tímto účelem bylo sestrojeno zařízení pro sledování dilatačních změn formovacích a jádrových směsí a také zařízení pro sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí. Vůbec první poznatky byly zaznamenány v roce 1981 v diplomové práci Tietla, kde je také poprvé popsáno zařízení pro měření dilatačních změn. Během dalších desetiletí procházelo inovacemi, které vedly ke zdokonalení výsledků měření. Na přístroji se samozřejmě prováděly i jiné experimenty, které byly součástí jak výzkumných činností tak diplomových prací studentů.

Úkolem této diplomové práce je sledování plynatosti a teplotní dilatace sádrových směsí.

**„Diplomová práce vznikla na základě podpory studentského projektu studentské grantové soutěže, označované na TU v Liberci 2822, v rámci podpory speciálního vysokoškolského výzkumu.“**

# 1 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

## 1.1 Základní charakteristika slévárenských forem

Jednoduše řečeno je slévárenská forma pracovní předmět vyrobený ze žáruvzdorného materiálu. Uvnitř formy je dutina, která svým tvarem odpovídá opaku (negativu) budoucího odlitku. Slévárenská forma může být vyrobena z různých materiálů, musí to však být takové materiály které jsou schopny odolat vysokým teplotám. Formy mohou být například kovové, pískové, keramické či sádrové. Formy je možné dělit několikerým způsobem, podle toho jaká kritéria si pro rozdělení zvolíme. Mohou se dělit například podle materiálu, z kterého jsou vyrobeny. Pak můžeme rozlišit formy kovové, pískové, keramické, sádrové atd. . Nyní bych se chtěl blíže věnovat dělení forem podle jejich použitelnosti. Podle kritéria použitelnosti můžeme formy rozdělit na trvalé, polotrvalé a netrvalé.

Trvalé formy, jinak označované jako kokily, jsou vyráběny z kovů nebo jejich slitin. Nejvíce využitelné jsou při velkosériové výrobě, kde je potřeba velké množství odlití. Je zde také využívána vysoká akumulace tepla a rychlé tuhnutí a chladnutí odlitku. Použití trvalých forem je rozmanité. V dnešní době nacházejí hlavní uplatnění při vysokotlakém lití hliníkových odlitků, které se vyznačují velkou členitostí a malou tloušťkou stěn. Uplatňují se však i při nízkotlakém lití odlitků. Kokily bývají vyráběny z litiny s lupínkovým grafitem, oceli, mědi nebo grafitu.

Ale i tyto trvalé formy dojdou časem určitého opotřebení. Při provozu jsou velmi tepelně namáhány, což po určité době provozu způsobuje tvorbu map na povrchu kokily. Časem se mohou vytvářet i určité deformace či praskliny. Při takové míře poškození je již kokila dále nepoužitelná a musí se vyměnit.

Zpravidla se do kokil odlévají slitiny kovů, které mají nižší teplotu tání, než je teplota tání materiálu kokily. Ale pokud se vytvoří dostatečně vhodné podmínky ( jedná se především o volbu materiálu kokily a o její chlazení), je možné do kokily odlít stejný materiál jako z kterého je vyrobena kokila, nebo dokonce materiál s vyšší teplotou tání, než je teplota tání kokily.

Druhým typem forem jsou formy polotrvalé. Tyto formy mohou být také při odlévání použity vícekrát, ale již nesnesou takový počet odlití jako formy trvalé. Také jsou náchylnější na poškození. Po každém odlití se musí zkontrolovat, opravit případná poškození a znovu přesušit (vyžítat). Odlitky určené pro polotrvalé formy musí mít značné úkosy a musí být jednoduchých tvarů bez výstupků, aby se

nepoškodily smršťováním odlitků. Formy se vyrábějí nejčastěji ze šamotových a hliněných směsí s různými přísadami (žáruvzdorné jíly typu kaolinitu, grafitu atd.). Zpravidla se vysušují při teplotách 200 až 400 °C, některé typy se též vypalují (cca 600 °C). Mezi polotrvalé formy můžeme zařadit také formy grafitové. Výběr materiálu pro určitou formu se odvíjí od velikosti odlitku a také lící teploty odlévaného kovu.

A nyní se dostáváme k formám netrvalým, tedy pískovým. Jak již z názvu vyplývá, formy netrvalé jsou pouze na jedno použití. Po ztuhnutí se odlitek vytluče a forma se tak zničí. V jedné formě se však dá zhotovit několik odlitků najednou. „Do netrvalých forem se nejčastěji odlévají litiny, popř. některé slitiny hliníku nebo mědi. Netrvalé formy pomaleji akumulují teplo z odlitku (nejsou dobrými vodiči tepla) a odlitky v nich tuhnou poměrně dlouhou dobu. Pískové formy se vyrábí z formovacích směsí.

### **1.1.1 Formovací směsi**

Formovací směsi se opět různými způsoby rozdělují. Můžeme tak rozlišit formovací směs modelovou, výplňovou, jádrovou a jednotnou. A nebo pokud se budeme zabývat obsahem volné vody ve směsi, můžeme mluvit o směsích bezvodých, polosuchých, směsích na syrovo, směsích na přisušení nebo směsích na sušení.

Modelová formovací směs se připravuje z nových surovin. Tato směs musí být velmi kvalitní, protože přichází přímo do styku s tekutým kovem. Tvoří tak líc formy. Výplňová směs nemusí být již tak kvalitní, vyplňuje zbývající prostor formy. Pro její výrobu se často používají již použité a roztlučené formy. Jádrové směsi tvoří celý objem nebo jen líc směsí. Po stránce kvalitativní, jsou na ní kladeny ještě vyšší nároky než na formovací směs modelovou. Jádrová směs je vyráběna z vysoce jakostních surovin. Směs jednotná se používá při technologii jednotných bentonitových směsí pro strojní výrobu forem, kde celý objem formovacího rámu tvoří jediná směs.

Za volnou vodu ve směsi považujeme tu, kterou lze ze směsi odstranit sušením při teplotě 100 °C. Bezvodé směsi neobsahují více jak 0,1% vody. Nejsou to směsi na bázi jílových pojiv, ale plastifikátorem pojiva jsou organické sloučeniny, např. alkoholy. Polosuché směsi obsahují do 3% vody. Tyto směsi nepotřebují velké plastifikační vlastnosti, slouží převážně pro strojní formování. Směsi na syrovo

obsahují do 5% vody. Nemusí se sušit, zajišťují nejprogresivnější výrobu forem. Směsi na přisušení obsahují 6-7% vody. Jsou vhodné tam, kde se suší pouze líc forem. Po vysušení je třeba ihned odlévat, aby nedošlo k opětovnému navlhnutí. Směsi na sušení obsahují více jak 7% vody. Formy se suší v celém objemu, kdy odstraňujeme volnou vodu při 100 °C.

Formovací směsi se obvykle skládají ze dvou základních složek, a to ostřiva a pojiva. Dále může formovací směs obsahovat přísady a vodu. Voda se přidává například u jílových a anorganických pojiv (sádra, vodní sklo), kdy poskytuje směsím vhodné vlastnosti pro jejich formování. Ve formovací směsi jsou důležité také přísady, což jsou látky, které zlepšují některé vlastnosti směsi při styku s roztaveným kovem nebo po ztuhnutí odlitku. Jako např. odolnost proti zapečeninám, kdy do formovací směsi přidáváme kamenouhelnou moučku - letek, který po odlití formy hoří, vytváří plyny, které působí proti nadměrné penetraci taveniny mezi zrna formy. Nebo přidáváme dřevěné piliny, které po vyhoření zvyšují prodyšnost formy, popř. přidáváme látky zvyšující rozpadavost formy.

Pro konkrétní využití formovacích směsí jsou důležité jejich technologické vlastnosti. Vlastnosti formovacích směsí třídíme do tří skupin. Vlastnosti směsí za syrova ovlivňují postup výroby formy. Vlastnosti směsí po vysušení nebo chemickém zpevnění. A vlastnosti směsí, kdy na ni působí vysoké teploty taveniny.

### 1.1.2 Vlastnosti za syrova

Vaznost neboli pevnost za syrova je schopnost nevysušené spěchované formovací směsi odolávat působení vnějších sil. Míru vaznosti určuje pevnost v tlaku nebo ve stříhu. Pro zkoušku v tlaku se používá váleček  $\square 50 \times 50 \pm 1$  mm, z upěchovaného písku, třemi údery tzv. beranidla (speciální zařízení pro výrobu vzorků). Váleček se vyrábí ve speciální trubce do které se nasype cca 150g až 180g zkoušené směsi. Pevnost v tlaku lze stanovit:

$$R_{mt} = \frac{F_{\max}}{S_o}, \quad (1.1)$$

kde značí:  $R_{mt}$  - Pevnost v tlaku [ $M_{pa}$ ];

$F_{\max}$  - zátěžnou sílu, která porušila váleček [N];

$S_o$  - průřez válečku [ $mm^2$ ].

Nesprávná vaznost směsi způsobuje vady tvarů a rozměrů odlitku.

Prodyšnost je schopnost spěchované směsi propouštět plyny a páry. Provádí se na standardním válečku  $\square$  50 x 50 mm. Ke zkoušení prodyšnosti se používá speciální přístroj, kterým se stanoví jednotky prodyšnosti SI ( j.p. SI ), tj. počet kubických centimetrů vzduchu, který se protlačí objemem 1 cm<sup>3</sup> vzorku při přetlaku vzduchu 100 Pa za 1 minutu. Malá prodyšnost směsi vede k vadám odlitku například bublinám a odvařeninám.

Tvrdost je schopnost spěchované směsi odolávat vnikání cizího tělíska. Tvrdost se měří analogicky jako u kovů, speciálními hodinkovými tvrdoměry. Existuje souvislost mezi vazností a tvrdostí. Čím má směs menší vaznost, tím má menší i tvrdost.

Tekutost je schopnost pohybu formovací směsi do stran, tedy ve směru kolmém na směr přechující síly.

Formovatelnost je schopnost formovací směsi vlivem působící síly měnit tvar podle určitého modelu.

Vlhkost ukazuje obsah volné vody ve směsi, tu lze odstranit sušením při teplotě 100 °C. Optimální množství vody ve směsi je cca 3 %. Vlhkost stanovujeme z navážky směsi 50g, nebo 100g, kterou sušíme ve speciální sušce při teplotě cca 105 °C po dobu asi 15 minut (až do ustálení hmotnosti vysušené směsi). Přivlhčená směs způsobuje na odlitku vady, jako odvařeniny, zálupy atd.

Drobivost je oddělování zrněk směsi po jejím spěchování. Projevuje se především u bentonitových směsí, které obsahují málo vody.

### 1.1.3 Vlastnosti směsí po vysušení nebo po chemickém zpevnění

Pevnost je schopnost směsi odolávat vnějším silám po zpěchování a vysušení. Míra odolnosti se zkouší jako u směsí za syrova. Vysušením se pevnost směsí zvyšuje. U směsí na bázi jílových pojiv je pevnost po vysušení až desetkrát vyšší než za syrova a u směsí s olejovými a pryskyřičnými pojivy až stokrát vyšší než za syrova.

Otěruvzdornost je odolnost proti otěru, tedy odírání zrn vysušené nebo zpevněné směsi. Je důležitá hlavně u jader. Zkouší se pomocí vnikání hrotů, fréz nebo brusných kotoučů. Malá otěruvzdornost způsobuje vady rozměrů a tvarů odlitků v místech, kde byla před litím jádra.

Navlhavost je schopnost směsi po vysušení zpětně přijímat vlhkost z okolí. Proto je třeba ihned do vysušených forem a jader odlévat. Velkou vlhkostí směsi vznikají na odlitku vady, např. odpařeniny a zálupy. Čím je směs méně vlhká, tím má větší pevnost v tlaku a tvrdost, avšak nižší prodyšnost.

#### 1.1.4 Vlastnosti směsí za vysokých teplot

Pevnost - při odlévání taveniny do formy musí forma mít vysokou pevnost, aby byl překonán dynamický a později hydrostatický (metalostatický) tlak taveniny. Při tuhnutí taveniny je však třeba, aby forma byla dostatečně poddajná a její pevnost umožňovala plynulé smrštění odlitku. Pokud forma při smrštění odlitku není dostatečně poddajná, pak vzniká tzv. bržděné smršťování odlitku, které vede k jeho porušení a vzniku trhlin.

Rozpadavost je schopnost rozpadu formy po ztuhnutí a chladnutí odlitku. Je důležitá hlavně při odstraňování jader z odlitku. Dobrou rozpadavost vykazují formy z bentonitových směsí. Formy a jádra na bázi pryskyřic mají dobrou rozpadavost, jelikož při vyšších teplotách cca 800 °C pryskyřice ztrácí pojící účinek. Špatnou rozpadavost vykazují CT směsi (na bázi vodního skla - CO<sub>2</sub>), mají velkou zbytkovou pevnost. Ta je způsobena tím, že vodní sklo při teplotách 400 a 800 °C vykazuje dvě pevnostní maxima.

Plynatost označuje množství plynů a par, které směs vyvine při určité teplotě, především při ohřevu odlévanou taveninou. U některých směsí vlivem vysoké teploty dochází k rozkladu složek formovací směsi a vývinu plynů a par. Větší vývin plynů vykazují směsi na bázi pryskyřic. Vlivem plynů vznikají vady odlitku například bubliny a odpařeniny.

Tepelná roztažnost je stav, kdy na lici formy vznikají tlaková pnutí, která vedou k vyborcení líce. To je způsobeno roztažností formovací směsi a tedy i změnou rozměrů formy po jejím zahřátí odlévanou taveninou. K tomu jsou náchylné formy na bázi křemenného ostřiva (SiO<sub>2</sub>). Křemen prodělává při teplotě 573 °C přeměnu b - a, kdy se zvětšuje jeho objem cca 1,3 %. Při teplotě 1025 °C probíhá u křemene tzv. cristobalitická přeměna, při ní se zvětšuje objem o 17 %. Aby se důsledky těchto přeměn trochu eliminovaly, je třeba aby ohřev křemene byl při teplotách přeměny pozvolný. V důsledku roztažnosti křemene vznikají na odlitku vady tzv. zálupy.

Chemická odolnost má značný vliv na čistotu povrchu odlitku. Chemický účinek se projevuje reakcí kyselých a zásaditých oxidů ( např.  $\text{SiO}_2$  a zásaditých oxidů taveniny např.  $\text{MnO}$  ) za vzniku snadno tavitelných látek, které způsobují připečeniny formovací směsi na povrchu odlitku, což jsou neodstranitelné vady.

Žáruvzdornost je odolnost formovací směsi proti vysokým teplotám způsobeným taveninou. Žáruvzdornost závisí na chemickém složení ostřiva resp. na možnosti jeho slínování.

## 1.2 Ostřivo a pojivo

Ostřivo je hlavní složkou formovací směsi, tvoří až 98% její hmotnosti, je tak její nosnou částí, tzv. skeletem. Ostřivo je ze zrnitého, žáruvzdorného materiálu, kdy velikost zrn je větší než 0,02 mm. U ostřiva jsou nejdůležitější tyto vlastnosti: tvar a povrch zrn, chemická podstata a zrnitost (tedy rozsah velikosti zrn ve směsi). Ostřiva můžeme dále rozlišovat. A opět záleží na tom, z jakého pohledu se chceme ostřivy zabývat.

První možné rozlišení je podle chemické povahy ostřiva. Rozlišujeme tak ostřiva kyselá (křemenné písky), neutrální (šamot, chromit, korund, zirkon) a zásaditá (magnezit, chrommagnezit, magnezitchrom).

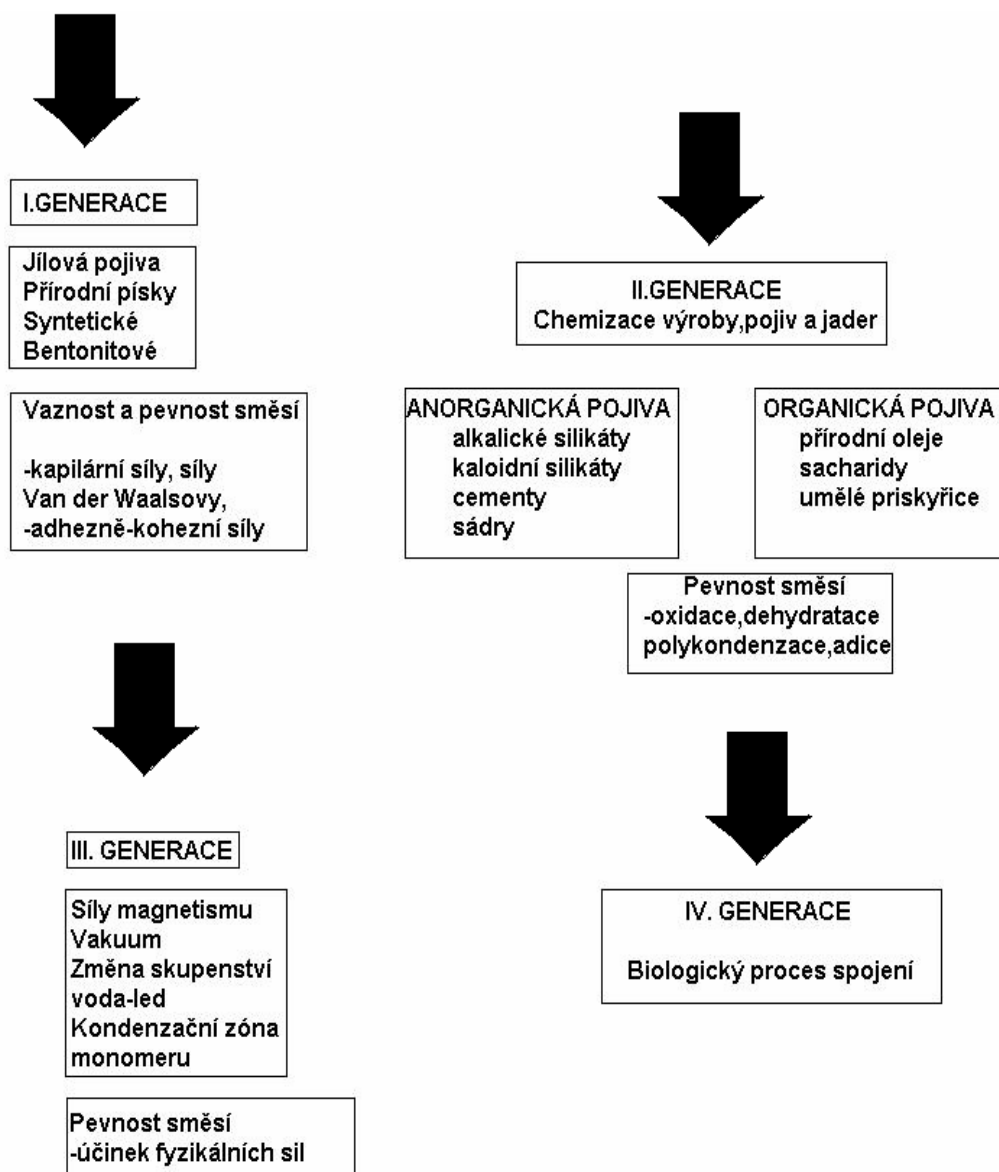
Dále můžeme ostřiva rozlišovat podle původu vzniku. Tak je dělíme na přirozená (křemenné písky, zirkoniové písky, olivín) a umělá (šamotový lupek, elektrokorund, kovové ostřivo). Druh ostřiva pro danou formu volíme podle několika faktorů. A to podle chemické povahy odlévaného kovu, podle druhu pojiva, podle druhu odlévané slitiny (licí teplota), podle tvarové obtížnosti a tloušťky stěn odlitku a v neposlední řadě podle ekonomické dostupnosti směsi. Jeli směs připravovaná z jednotlivých komponent (ostřiva, pojiva), hovoříme o syntetických směsích. Stále se také ve slévárnách používají přírodní písky. Ty obsahují křemenný písek (ostřivo), jílové pojivo a vodu. Používá se především na výrobu sušených forem a jader ve slévárnách neželezných kovů a některých slévárnách litiny. Pískové formy jsou však pomalu na ústupu. Je to dáno především rostoucími požadavky na povrchovou jakost odlitků a na vysokou produktivitu práce.

Druhou důležitou složkou formovací směsi je pojivo. Obecně se za pojiva označují látky organického nebo anorganického původu, které lze upravit do tekuté nebo kašovité formy, a které pak z této formy relativně snadno přecházejí do formy pevné.



Proces zpevňování lze rozdělit na dvě na sebe navazující stadia - tuhnutí a tvrdnutí. Ve fázi tuhnutí ztrácí tekutá nebo kašovitá hmota svoji původní zpracovatelnost a postupně nabývá charakteru pevné látky. Ve fázi tvrdnutí pak vzniklá pevná látka postupně získává vyšší pevnost. Spojením pojiva s ostřivem vzniká pevnost formovací směsi - vaznost za syrova, pevnost po vysušení a vytvrzení, pevnost za vysokých teplot i zbytková pevnost směsi (rozpadavost po odlití).

Dlouholetý vývoj pojivových systémů formovacích směsí můžeme rozdělit do čtyř generací. Na obr. 1-1 je uvedeno schéma rozdělení slévárenských pojiv.



Obr. 1-1 Schéma rozdělení slévárenských pojiv, podle [2]

### 1.2.1 Pojiva první generace

Pojiva první generace jsou pojiva jílová, kde pojení je výsledkem sil kapilárního tlaku a sil Van der Walsových. Mezi částicemi ostřiva a pojiva působí adhezní, neboli přilnavé síly, mezi částicemi pojiva pak působí síly kohezní. Jílová pojiva jsou nejčastěji součástí přírodních směsí. Rozlišujeme tři druhy jílu, a to jíl kaolinitický ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), illitický a montmorillonitický ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ).

Kaolinitický jíl je pojivo se šamotovým lupkem a tvoří šamotovou formovací směs, která se používá k výrobě forem a jader masivních ocelových odlitků. Je to směs na sušení, která se suší při teplotě  $650^\circ\text{C}$ . Ze všech jílu má nejlepší žáruvzdornost, ale nejmenší bobtnavost.

Illitický jíl nejčastěji doprovází přírodní písky. Nejdůležitějším minerálem této skupiny je glaukonit. Tento jíl se používá pro odlévání těžkých litinových odlitků, protože má dobrou žáruvzdornost i dobrou bobtnavost.

Má-li jílové pojivo více jak 75-80% montmorillonitu, nazývají se tyto jíly bentonity. Bentonity patří k dodnes nejrozšířenějším jílovým pojivům a slouží k přípravě bentonitových směsí. Jejich výborná pojivová vlastnost umožňuje přípravu směsí s minimálním obsahem pojiva a tudíž i s minimálním potřebným obsahem vody (pod 5%). Díky tomu se z bentonitové směsi mohou vyrábět formy na syrovo na automatických formovacích linkách. První generace směsí neumožňuje využívat vysokého stupně mechanizace a automatizace, která je potřebná zejména při výrobě jader. Proto po 2. světové válce přichází druhá generace pojiv.

### 1.2.2 Pojiva druhé generace

Druhá generace pojiv využívá chemických reakcí. Zahájení éry chemizace ve slévárenských formovacích směších přináší československý objev chemicky tvrzených směsí, dnes přesněji označován jako  $\text{CO}_2$  - proces. O tento objev se zasloužil dr. L. Petržela v roce 1947. Tato geniální myšlenka je založena na velmi jednoduchém principu. Ostřivo je pojeno koloidním roztokem křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  – vodní sklo), vzniká nevazná, dobře pěchovatelná směs, která se vytvrdí reakcí s  $\text{CO}_2$  [2]. Díky reakci s  $\text{CO}_2$  jádra a formy získávají vysokou pevnost (nad 1Mpa v tlaku). To umožňuje do těchto forem odlévat na syrovo i velmi těžké odlitky z oceli, litin i neželezných kovů. Jako ostřivo se dá použít křemenný písek, ale i celá řada nekřemenných ostřiv (zirkon, korund, kovové kuličky). Do formy

z takto vytvořené směsi je možné odlít i unikátní masivní odlitky o váze 300 i více tun.

Pojiva druhé generace mohou být organická i anorganická. Organickými slévárenskými pojivy jsou myšleny přírodní oleje, umělé pryskyřice a sacharidy. Tato pojiva mají uplatnění především v oblasti výroby jadrových směsí. Tyto směsi mají vysokou pevnost po vytvrzení, nízkou teplotu termodestrukce a dobrou rozpadavost. Nevýhodou pryskyřičných pojiv je vysoká plynotvornost.

Mezi pojiva anorganická se řadí vodní sklo, sádra, cement a další koloidní silikáty. O směsích s vodním sklem, dříve nazývaných chemicky tvrzené směsi nebo CT směsi, jsem se zmiňoval již výše. Původní CT směsi měly některé nevýhody, ale právě tyto nevýhody byly hnacím motorem pro vývoj nových samotvrdnoucích směsích s vodním sklem. Mezi nevýhody CT směsí patřila např. velmi malá vaznost, nižší pevnost po vytvrzení (při srovnání s organickými pojivy), vysoká spotřeba  $\text{CO}_2$  nebo zhoršená rozpadavost. V průběhu let docházelo v technologii této metody k určitým zlepšením. Zvýšila se pevnost po vytvrzení, snížila se spotřeba pojiva a zlepšila se rozpadavost. Formovací směsi s vodním sklem můžeme rozdělit do dvou skupin. Směsi s ovládaným ztužováním (profukováním  $\text{CO}_2$ , vytvrzování vzduchem, vytvrzování mikrovlnné a infračerveným zářením) a směsi bez ovládaného ztužování (ST směsi a samotvrdnoucí směsi).

Mezi anorganická pojiva řadíme také sádrová pojiva, respektive sádrové formovací směsi. Sádra má zde funkci jak ostřiva tak pojiva, jen výjimečně se přidává jemné ostřivo. Sádre a sádrovým směsím se budu věnovat v následující kapitole. Přejdu tedy nyní k dalšímu anorganickému pojivu, a to cementu.

Cementové formovací směsi patří k nejstarším. Používají se hlavně v Německu a Francii, u nás se téměř nepoužívají. V Německu i ve Francii se vyrábí více druhů speciálních cementů, proto se zde cementové formy uplatňují více. Běžná cementová směs obsahuje 70 až 80 hmot. dílů křemenného ostřiva, 10 až 12 hmot. dílů cementu a zbytek je voda. Ve formovacích směsích s cementovým pojivem se používá ostřivo křemenné, šamotové či olivínové. Při výrobě cementových forem a jader je důležité, aby cement dostatečně chemicky vázal veškerou vlhkost směsi. Cementové směsi pak při dokonalém vytvrzení při styku roztaveného kovu s formou neuvolňují téměř žádné plyny. Formovací směsi s cementovým pojivem se používají pro těžké odlitky z litiny a oceli. Hlavní výhodou cementových směsí je jejich tuhnutí na volné atmosféře bez komplikovaného sušení. Ale i přesto jsou v dnešní

době tyto směsi na ústupu. Jako anorganické pojivo se také používá etylsilikát, což je organický ester kyseliny křemičité. Používá se pro výrobu keramických forem metodou vytavitelného modelu. Nejpoužívanějším typem v našich slévárnách je Etylsilikát 40, což je v podstatě směs polyethylhoxysiloxanů. Etylsilikátová pojiva jsou základním pojivem při výrobě skořepinových forem na vytavitelný model.

### 1.2.3 Pojiva třetí generace

Pojiva třetí generace jsou založena na fyzikálním účinku pojení s ostřivem. Fyzikální účinek může být pomocí magnetického pole, zmrazení, vakua. Magnetický způsob pojení vyžaduje jiný druh ostřiv než je ve slévárenství běžně využíván. Jsou to jemné broky z magnetického materiálu, nejčastěji oceli. Magnetická forma se vyrábí zasypáním spalitelného modelu. při odlévání do magnetické formy je důležité, aby nedošlo k překročení kritické teploty, kdy ostřivo ztrácí magnetické vlastnosti. U vakuové metody se již používá běžné křemenné ostřivo, tato metoda je však velice náročná na modelové zařízení. U metody zmrazování se používá ostřivo, které obsahuje i vodu. Tato forma se pak zmrazuje kapalným dusíkem nebo CO<sub>2</sub>. Poté do formy můžeme odlít taveninu. Forma se však při odlévání nesmí zahřát na vyšší teplotu jak -10°C, to by pak ztratila svoji pevnost.

### 1.2.4 Pojiva čtvrté generace

Pojiva čtvrté generace úplně nesplňují představy pojiv budoucnosti. Ty splní pojiva, která se budou co nejvíce blížit složení lidského těla a budou tedy využívat biologické procesy pojení.

## 1.3 Sádra a sádrové formovací směsi

Jelikož je teoretická část mé diplomové práce zaměřena na sledování plynatosti a tepelné roztažnosti vzorků ze sádrových směsí, chtěl bych se v této kapitole věnovat její charakteristice.

Sádra je nejužívanějším materiálem ve stavebnictví, řadí se mezi maltoviny. Maltoviny jsou anorganické látky nekovové povahy, získané ze vhodných surovin, které po tepelném zpracování a úpravě mají schopnost, při rozdělení s potřebným množstvím vody, tvořit plastickou, dobře zpracovatelnou hmotu. Tuhnou a tvrdnou na vzduchu (popřípadě i pod vodou) v látku velmi podobnou zpevněné sedimentární hornině. Maltoviny se dále rozdělují na vzdušné maltoviny, které tuhnou pouze na vzduchu, ve vodě nemají dostatečnou stálost. Do této skupiny se zařazuje sádra,

vzdušné vápno a některé další maltoviny. Hydraulické maltoviny tuhnou jak na vzduchu, tak ve vodě. K hydraulickým maltovinám patří především hydraulické vápno a cementové výrobky. Ve slévárenské praxi se sádra používá výjimečně, avšak slouží k výrobě slévárenských forem. Pro jejich zhotovení se používá sádra, popř. sádra a další výhodné komponenty, které zvyšují užité vlastnosti sádry pro slévárenské účely. Tyto materiály se nazývají sádrové formovací směsi.

Základem sádrových formovacích směsí je sádra, která je v podstatě síran vápenatý. Sádra je anorganické práškové pojivo, získané tepelným zpracováním (tj. částečnou nebo úplnou dehydratací) přírodního nebo umělého sádrovce ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Sádra patří k nejdéle používaným pojivům, byla známa již v Egyptě nebo v Asýrii. V Evropě je používána od raného středověku.

Sádra má schopnost hydratovat (tuhnout) různou rychlostí podle toho, jakým způsobem byla připravena. Snadno se zpracovává a lze ji přizpůsobit různým stavebním nebo technickým účelům. Sádra se vyznačuje schopností pohlcovat vlhkost (je hydroskopická), což se pozitivně uplatňuje zejména při regulaci vlhkosti v obytných prostorech. Objemové změny v průběhu tvrdnutí sádry jsou poměrně velmi malé, nízká je také tepelná vodivost. Základními nedostatky sádry je její citlivost na vlhkost a zejména pokles pevnosti ve vlhkém prostředí. Rovněž koroze výztuže v sádrových materiálech je poměrně vysoká, a to díky jejich velké pórovitosti. Navíc sádrová pojiva nevytvářejí, na rozdíl od vápna nebo cementu, alkalické prostředí, v němž by ocel byla pasivována. Vzhledem k nízké objemové hmotnosti a vysoké pórovitosti má sádra malou zvukovou pohltivost.

### 1.3.1 Výroba sádry

K výrobě vápenosíranových pojiv se používají jak suroviny přírodní (primární), tak i suroviny odpadní (druhotné).

Přírodní sádrovec je přírodní forma dihydrátu síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), který vzniká odpařováním (evaporací) mořské vody z uzavřených mořských nebo jezerních pánví - lagun nebo tzv. salin.

Jedinou ložiskovou oblastí s výskytem průmyslových ložisek přírodního sádrovce je v České republice opavská pánev s usazeninami třetihorního stáří v okolí Opavy a Hlučína. V provozu je nyní jediný lom u obce Koběřice.

Dalším zástupcem je přírodní anhydrit – přírodní forma bezvodého síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4$ ), která je spolu se sádrovcem a případně také halitem (solí

kamennou), součástí evaporitových ložisek. Má tedy stejný způsob vzniku jako sádrovec a jejich vznik závisí pouze na teplotě roztoku. V evaporitových sedimentech, ale může vznikat také dehydratací (ztrátou vody) ze sádrovce; naopak sádrovec může vznikat hydratací anhydritu. Složení  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  může obsahovat heterogenní příměs jílu. Se zvyšující se teplotou postupně ztrácí vodu – při cca 65 °C přechází na hemihydrát (bassanit) a kolem 100 °C vzniká bezvodý anhydrit. Druhotné suroviny vznikající buď při odsiřování spalin tepelných elektráren a tepláren (tzv. energosádrovce) nebo jako vedlejší produkt v chemickém, potravinářském nebo sklářském průmyslu (tzv. chemosádrovce). Energosádrovce i chemosádrovce představují v současnosti plnohodnotnou náhradu přírodního sádrovce. Používají se pro výrobu sádry, sádrokartonových desek a dalších výrobků na bázi sádry nebo jako regulátor tuhnutí při výrobě cementu. Zpravidla mají vysoký obsah sádrovce (často nad 90 %), od přírodní suroviny se však odlišují malou velikostí zrna a vyšší vlhkostí.

Sádro je možno vyrábět několika technologickými postupy. Konkrétní výrobní postup a zařízení se volí podle toho, jaké budou požadavky na vyrobenou maltovinu a jaké suroviny jsou k dispozici. Před výpalem suroviny je zpravidla natěžená hornina podrcena a uložena v zásobnících. Ke kalcinaci (dehydrataci) sádrovce může docházet např. :

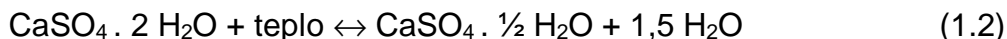
v sušících rotačních mlýnech, v nichž se surovina mele a současně kalcinuje procházejícím teplým vzduchem (používá se zejména pro výrobu rychle tuhnoucího  $\beta$  - hemihydrátu)

rotačních pecích s přímým nebo nepřímým zahříváním, vytápěných plynem nebo olejem

šachtových pecích při teplotách 800 až 1000 °C (tento způsob slouží k výrobě pomalu tuhnoucí sádry)

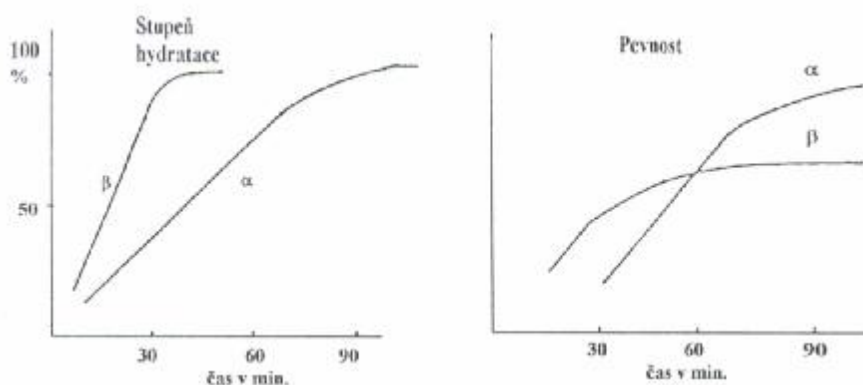
vařácích – kovových kotlích o objemu 5 – 15 m<sup>3</sup>, které jsou opatřeny míchadlem a v nichž se pomletý sádrovec za přívodu tepla míchá a unikající pára nakypřuje („vaří“) vznikající sádro; teplota suroviny dosahuje 130 – 150 °C (jedná se o starší, periodický způsob výroby), autoklávech, které pracují s přetlakem při teplotě okolo 120 °C (jde o ekonomicky velmi nákladný postup, který ale produkuje nejkvalitnější  $\alpha$  - sádro).

O vlastnostech sádry rozhoduje mineralogické složení. Nejběžnější reakcí při výrobě sádry je částečná dehydratace (při teplotách 110 až 150 °C) dihydrátu na půlhydrát (hemihydrát, minerál bassanit), kterou lze popsat následující rovnicí:



Podle způsobu tepelného zpracování vznikají z výchozí suroviny různé krystalické formy hemihydrátu (tzv.  $\alpha$  a  $\beta$ -sádra), které se svými vlastnostmi podstatně liší. V prostředí nasyceném vodní parou již od 115 °C (vyrábí se autoklávovacím procesem) vzniká  $\alpha$  - hemihydrát ( $\alpha$  - sádra). Ta má kompaktnější, uspořádanější krystalovou strukturu a vytváří pravidelně uspořádané, jehlicovité krystaly. Vyžaduje méně vody k hydrataci ( $v/s = 0,40$ ), tuhne za 15 až 20 minut a po zatvrdnutí kaše vykazuje vyšší pevnost.

Oproti tomu  $\beta$  - hemihydrát ( $\beta$  - sádra) vzniká v prostředí nenasyčeném vodní parou běžným zahříváním sádrovce (na teplotu 100 až 150 °C) za atmosférických podmínek. Pro výrobu  $\beta$  - hemihydrátu je žádoucí co nejvyšší obsah dihydrátu (sádrovce), přítomnost anhydritu by mohla ovlivnit kvalitu výsledného produktu. Částice  $\beta$  - hemihydrátu jsou pórovité a mají nepravidelný tvar.  $\beta$  - hemihydrát má větší počet krystalových poruch v krystalové mřížce, při stejné zrnitosti má větší měrný povrch než  $\alpha$  - sádra, a tím i větší potřebu záměsové vody ( $v/s = 0,60$ ). Z toho pak vyplývá i nižší pevnost zatvrdlé  $\beta$  - sádry. Na obr. 1-2 jsou uvedeny stupně hydratace a pevnosti  $\alpha$  a  $\beta$  sádry.



a) – stupeň hydratace sádry

b) – srovnání pevnosti  $\alpha$  a  $\beta$  sádry

**Obr. 1-2 Srovnání průběhu hydratace a nárůstu pevnosti u  $\alpha$  a  $\beta$  sádry dle [3]**

Kalcinací sádrovce za vyšších teplot vznikají různé typy anhydritu. Jako první vzniká **anhydrit III**, který má opět dvě formy -  $\alpha$  a  $\beta$  - podle toho, zda vznikl z  $\alpha$  nebo  $\beta$  - hemihydrátu. Alfa modifikace vzniká při teplotách 200 až 210 °C, beta modifikace při teplotách 170 až 180 °C. Obě formy anhydritu III jsou nestálé (rozpustné) a přeměňují se zpětně na hemihydrát, a to i působením vzdušné vlhkosti. Uvedené modifikace anhydritu III se v přírodě nevyskytují, tvoří však součást rychle tuhnoucí sádry.

Anhydrit III přechází po dalším zahřátí na anhydrit II, u něhož se podle stupně zahřátí rozlišují:

- **anhydrit II-T** – jen slabě rozpustný, vzniká při teplotě výpalu 200 – 300 °C, jeho reakce s vodou s rostoucí teplotou výpalu klesá

- **anhydrit II-N** – nerozpustný, vzniká při teplotě 300 – 600 °C, s vodou reaguje velmi pomalu

- **anhydrit II-E** (tzv. estrichová sádra), je vysokoteplotní modifikací  $\text{CaSO}_4$ , která vzniká při teplotě výpalu nad 600 °C, kdy se již část AII rozpadá na  $\text{CaO}$  a  $\text{SO}_2$ , schopnost reakce s vodou je minimální

Anhydrit II je jedinou modifikací bezvodého  $\text{CaSO}_4$ , která je za normálních (přírodních) podmínek stabilní. Při zahřívání nad 1200 °C přechází anhydrit II v anhydrit I, který však vždy obsahuje volný  $\text{CaO}$ . Anhydrit I je nestabilní a při ochlazení pod 1200 °C přechází zpět na anhydrit II.

Sádro rozdělujeme podle různých hledisek, např. podle použití, podle způsobu výroby nebo podle technologických vlastností. Podle technologických vlastností se zpravidla sádra dělí na rychle tuhnoucí sádro, pomalu tuhnoucí sádro, sádrové maltoviny a anhydritovou maltovinu.

Rychle tuhnoucí sádra se skládá především z hemihydrátu ( $\alpha$  i  $\beta$ ) a menšího množství anhydritu III ( $\alpha$  i  $\beta$ ). Vzniká při teplotách do 150 °C, maximálně 170 °C.

K rychle tuhoucím druhům sádry patří:

- *stavební sádra*, která obsahuje pouze  $\beta$  – hemihydrát, a ze které se vyrábějí stavební dílce, omítky, sádrokarton, sádrovláknité desky

- *štukatérská sádra*, obsahující  $\alpha$  i  $\beta$  - hemihydrát

- *modelářská sádra*, tvořená převážně  $\alpha$  - hemihydrátem a používaná např. v keramickém průmyslu pro výrobu sádrových forem



Pomalu tuhnoucí sádra se získává výpalem sádrovce na teploty 800 - 1000 °C, kdy se  $\text{CaSO}_4$  snáze rozkládá na  $\text{CaO}$  a  $\text{SO}_2$ . Tvoří ji anhydrit I a II (asi 80 %), volné  $\text{CaO}$  (do 5 %) a hemihydrát (asi 15 %). Tuhnutí začíná u této sádry za 2 až 5 hodin a končí většinou za 9 až 12 hodin, ale může trvat i 40 hodin. Pomalu tuhnoucí sádra se používá výhradně ve stavebnictví, především na podlahy, obkladové desky a omítky.

Modifikovaná sádra je sádra, do které byly přidány přísady nebo příměsi (struska, cement, pucolány) pro zlepšení zpracovatelnosti, přilnavosti nebo dalších vlastností. Do této skupiny pojiv by se daly zařadit také tzv. historické sádroviny (De Wyldova, Scotova, Pariánská sádrovina nebo Keenův cement), které vznikaly výpalem sádrovce např. s vodním sklem, boraxem nebo kamencem.

Anhydritová maltovina se vyrábí jemným semletím přírodního anhydritu nebo anhydritu II, vzniklého výpalem sádrovce do 500 °C a vhodného budiče (např. cementem, vápnem, struskou, síranem sodným apod.).

### 1.3.2 Tuhnutí sádrových pojiv

Mechanismus tuhnutí sádry je přesně opačným procesem než její výroba ze sádrovce a lze zjednodušeně popsat rovnicí:



Sádra se po smíchání s vodou rozpustí a vytvoří přesycený roztok, ze kterého vykrystaluje dihydrát  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Krystaly dihydrátu postupně rostou a vzájemně srůstají, čímž vytvářejí pevný produkt. Rychlost tuhnutí sádry závisí na tom, kolik obsahuje anhydritu. Čím je vyšší teplota výpalu sádry, tím obsahuje více anhydritu a tím pomaleji tuhne. Doba tuhnutí sádry závisí na řadě faktorů, obecně ji lze zkrátit prodloužením doby míchání, snížením vodního součinitele, zvýšením teploty záměsové vody nebo přidáním urychlovačů tuhnutí ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Některé látky naopak dobu tuhnutí sádry prodlužují (klíh, kreatin, melasa, mléko, agar, kyselina citrónová). Sádrová pojiva, resp. sádrové formovací směsi se používají na výrobu sádrových forem pro výrobu přesných odlitků. Jen výjimečně se přidává jemné ostřiva. Zde sádra má nejčastěji funkci jak ostřiva, tak pojiva. Prášková sádra představuje polohydrát nebo anhydrit síranu vápenatého. Smícháním sádry s vodou, popř. s dalšími přísadami se získá sádrová břečka, která po určité době ztuhne

v kompaktní celek. Z chemického hlediska ztuhlá břečka představuje dihydrát síranu vápenatého. Pojivový systém sádry a vody je :



Levá strana rovnice (2.3) představuje sádrovou brečku, pravá strana ztuhlou sádry ve formě dihydrátu síranu vápenatého – kompaktní sádrovou formu. Takto vzniklá forma je málo prodyšná musí se sušit a žíhat. Sušení forem se provádí při teplotě 200°C, žíhání při teplotě 450°C. V současné době ve světě mají uplatnění tzv. napěněné sádrové formy, které obsahují povrchově aktivní látky, které po ztuhnutí sádrové břečky vytváří drobné bublinky, které přispívají ke zvýšení prodyšnosti formy.

### 1.3.3 Formy ze sádrových směsí

Velký problém, se kterým se setkáváme při výrobě forem sádrových směsí, je prodyšnost formy. Dobré prodyšnosti dosáhneme dodržáním přesně stanoveného technologického postupu a také vhodným složením samotné sádrové směsi. Problémem je i náchylnost formy k navlhání, které je příčinou následného odpařování. Od forem ze sádrových směsí vyžadujeme dobrou prodyšnost, odolnost proti zborcení při lití, minimální změnu rozměrů, při ohřevu na vyšší teploty zamezení prasklin na lící formy. Dané vlastnosti lze regulovat přidáváním přísad do formy ze sádrových směsí a správným dodržáním technologického postupu.

### 1.3.4 Výroba forem ze sádrových směsí

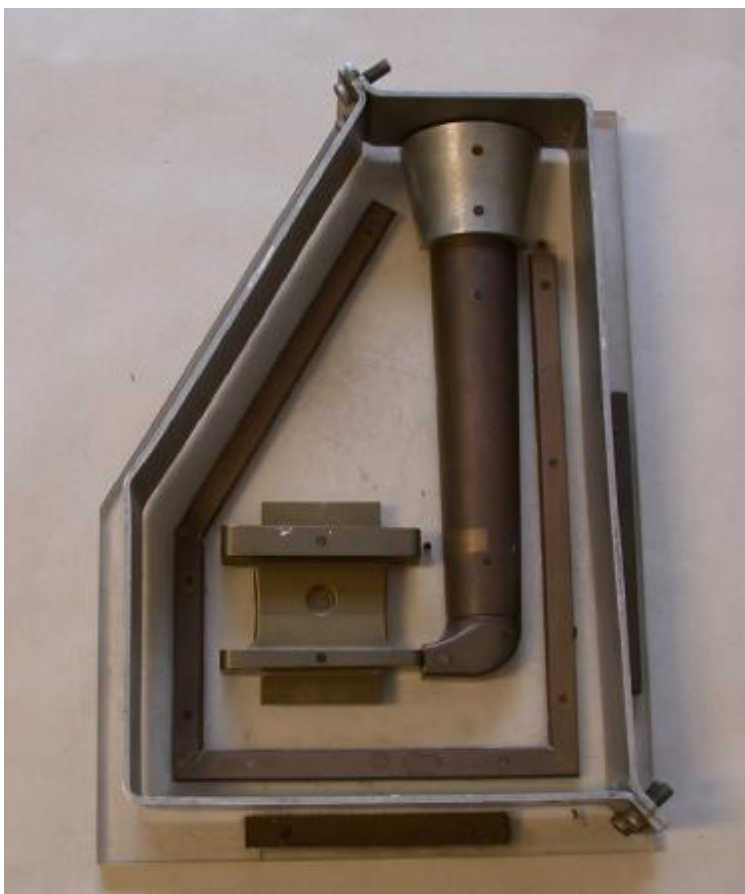
Při odlévání tekutého kovu do sádrové formy dochází na rozhraní sádra – kov k intenzivnímu odpařování vlhkosti obsažené v této formě nebo k uvolňování některých plynů podílů formovací směsi, které vznikají jejím tepelným rozkladem. Z tohoto důvodu je nutné tyto formy tepelně zpracovávat (sušit a žíhat).

První etapa tepelného zpracování - sušení – probíhá v sušárnách při teplotě do 200°C a odstraňuje se především voda volná (kapilární), která je určena takzvaným vodním poměrem (množstvím rozdělovací vody) a z části voda vázaná.

Druhá etapa tepelného zpracování – žíhání – se provádí při teplotě nad 200°C v komorových pecích, kdy se odstraňuje voda vázaná (krystalická) obsažená v dihydrátu nebo polohydrátu síranu vápenatého.

V zahraničí se používá pro komplexní výrobu sádrových forem metoda ANTIOCH nebo Bendix.

Výroba forem a jader ze sádrových směsí má specifické uplatnění při výrobě odlitků ze slitin s nízkou tavicí teplotou (slitiny hliníku, zinku, olova). Do těchto forem se nedoporučuje odlévat hořčík, který vykazuje vysokou afinitu ke kyslíku a vznikaly by nebezpečné explozivní reakce mezi odlitkem a zbytkovou vodou z formy. Odlitky odlévané do sádrových forem se vyznačují přesností rozměrů a hladkostí povrchu. Výroba odlitků ve formách ze sádrových formovacích směsí se řadí do skupiny netradičních způsobů lití a ve slévárenské praxi je tento způsob používán pro výrobu speciálních odlitků. Dříve se tato metoda používala pro výrobu uměleckých předmětů. V současné době se touto metodou vyrábí tvarově přesné díly s vysokou hladkostí povrchu používané pro radiotechnická zařízení. U nás se tyto formy vyráběly v TESLE Pardubice pro odlévání dílů pro radiotechniku a radiolokaci. Na obr. 1-3 je uveden rám pro výrobu sádrové formy.



**Obr. 1-3 Pohled na polovinu modelového zařízení**

### 1.3.5 Způsob výroby sádrových forem

Pro výrobu sádrových forem se používají dva způsoby konvenční a speciální:

**1. Konvenční** - označovaný jako metoda Bendix, kdy se formy (jejich poloviny) vyrábí na základě postupné přípravy sádrové břečky:

- míchání suchých komponent směsi
- sypaní smíšených suchých složek směsi do vody (je důležitý poměr vody a suché směsi)
- míchání připravené směsi složek s vodou, tj. příprava sádrové břečky (trvá 2 až 6 minut)
- ošetření modelu separačním prostředkem (speciálním olejem)
- vložení modelu do formovacího rámu
- nalití sádrové břečky do rámu, resp. na model
- tuhnutí sádrové břečky v rámu, trvá cca 15 min. při teplotě 20 °C
- vyjmutí poloviny formy z rámů
- sušení a žíhání forem
- skládání forem, popř. vložení sádrových jader do dutiny formy
- odlévání, musí být provedeno při teplotě formy cca 150 °C, aby forma na líci ihned nepraskla.

Základem pro výrobu těchto forem je sádra, která má jak funkci pojiva, tak i do jisté míry ostřiva, někdy se jako ostřivo používá křemenná moučka (mletý azbest je již ze zdravotních důvodů zakázán). K rozdělení sádrové břečky se používají dosti často urychlovače nebo zpomalovače tuhnutí sádry (soli některých kyselin, křihová voda, borax, atd.) kovový prášek (např. hliník), který zvyšuje tepelnou akumulaci formy, přísady zlepšující pevnost formy a voda. Pro výrobu forem lze použít i sádrovou směs: (65 hmot. dílů alabastrové sádry, 30 hmot. dílů křemenné moučky, 0.5 hmot. dílů dekatronu, 2.5 hmot. dílů směsi boraxu a dextrinu (1:2) a 2 hmot. díly práškového hliníku). Příprava a míchání suchých složek směsi se provádí ve speciálních mísičích, aby byla zajištěna homogenita připravované sádrové směsi. Tato směs se promíchává s vodou (v poměru 1.0:1.5). Sádrové formy mají velmi malou prodyšnost, proto se do směsi přidávají lubrikační přísady. Často se v dělicí rovině formy vytváří drobné drážky pro odplynění dutiny formy. Formy se suší a žíhají od teploty 180 °C až do 500 °C. Při vyšších teplotách žíhání ztrácí pevnost.

**2. Speciální** - výrobní metoda označovaná Antioch. Tato metoda byla vyvinuta v roce 1930 na Antioch College Rellow Sprongs, Ohio (USA) z důvodu

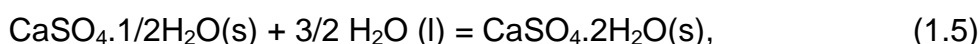
získání vyšší prodyšnosti sádrové formy. Z fyzikálního hlediska se dá tento proces rozdělit do 4 stádií. Tato stadia z technologického hlediska představují dvě časová období:

I. časové období - zahrnuje přípravu a výrobu sádrových forem, je v podstatě z části shodná s metodou Bendix:

- míchání suchých komponent směsi
- smíšení suchých složek směsi s vody (je důležitý poměr vody a suché směsi),
- míchání připravené směsi složek s vodou, tj. příprava sádrové břečky (trvá 2 až 6 minut),
- ošetření modelu separačním prostředkem (speciálním olejem),
- vložení modelu do formovacího rámu,
- nalití sádrové břečky do rámu, resp. na model,
- tuhnutí sádrové břečky v rámu, trvá cca 15 až 20 min. při teplotě 20 °C,
- vyjmutí poloviny formy z rámu.

Tomuto časovému období odpovídají tato fyzikální stadia:

1.stádium je pojení sádry, resp. technologická příprava formy. Podstatou výroby kompaktního masivu formy je prášková sádra, která reaguje s vodou za vzniku dihydrátu síranu vápenatého, což je v podstatě vyrobená sádrová forma:



Tento děj probíhá na vzduchu, tj. při teplotě cca 20 °C a tlaku  $10^5$  Pa.

II. časové období - zahrnuje zpracování vyrobené formy v autoklávu při určitém tlaku a teplotě. Tomu z fyzikálního hlediska odpovídá 2., 3. a 4. stádium přípravy sádrové formy v autoklávu.

2. stádium je zahřívání sádrové formy, resp. dihydrátu síranu vápenatého, v autoklávu, v atmosféře nasycené páry je ponechána po dobu 6 až 12 hodin prostředí vodní páry o tlaku 0.18 MPa, při teplotě 110 až 117 °C, kdy vzniká opět polohydrát síranu vápenatého (dihydrát je při této teplotě nestabilní), ale sádrová forma si uchovává svůj tvar.

3. stádium po dobu 6 až 8 hodin se forma v autoklávu vlhčí při tlaku  $10^5$  MPa a teplotě 220 °C, výsledkem je opět vznik dihydrátu síranu vápenatého. V

povrchových vzniká formy vznikají drobné krystalky dihydrátu vápenatého a ve vnitřku formy hrubé krystaly. Takto vzniklá struktura formy vykazuje prodyšnost 150 n.j.p. Povrch formy si neustále uchovává vysokou hladkost povrchu.

4. stádium probíhá sušení při tlaku  $10^5$  MPa a pomalým ohřevem na teplotu 100, 150, 200 až 300 °C po dobu 10 až 15 hodin.

Pak následuje jen skládání forem a odlévání gravitačním způsobem při teplotě cca 150 °C. Vedle výše uvedených způsobů výroby sádrových forem metodou Bendix a Antioch se ještě vyrábí tzv. napěněné sádrové formy.

### **1.3.6 Vliv tepelného zpracování na vlastnosti sádrových forem**

Důsledkem tepelného zpracování forem ze sádrových směsí dochází ke změně rozměrů formy. Snižuje se obsah vlhkosti a díky sušení se odstraňuje voda mechanicky vázaná. To má za následek změnu rozměrů molekul, které se vzájemně přitahují a to je důvodem zmenšení tvaru formy. Vzhledem k tomu, že ani vlhkost formy není ve všech místech konstantní, nejsou konstantní ani změny rozměrů ve všech místech formy. Následkem tohoto nerovnoměrného smrštění může docházet k vnitřnímu pnutí a to může způsobit popraskání povrchových vrstev formy.

### **1.3.7 Použití forem ze sádrových směsí**

Sádrové formy se používají pro výrobu přesných odlitků složitých tvarů. Touto metodou lze odlévat tenkostěnné odlitky (minimální tloušťka stěny 1.5 mm), neboť sádrové formy mají malou tepelnou akumulaci a tím i nízkou intenzitu odvodu tepla z tuhnoucího odlitku. Do těchto forem se odlévají odlitky s nižší tavící a lící teplotou cca 1000 °C. Při vyšší teplotě lití by došlo k popraskání formy nebo její chemické destrukci. Přesnost odlitků je  $\pm 0.05$  až 0.3 mm pro jmenovité rozměry 20 až 100 mm s drsností povrchu 1.0 až 5.5  $\mu\text{m}$ . Nízká drsnost povrchu se docílí s použitím jádra ze sádrové směsi.

## **1.4 Teplotní roztažnost (dilatometrie) pevných látek**

Roztažností pevných látek se zabývá vědní obor, který se nazývá dilatometrie. Zařízení určené pro výpočet délkových změn se nazývá dilatometr. Vše je založeno na sledování rozměrových změn, které jsou důsledkem změn krystalických mřížek krystalických látek. Dilatometr získává v aktuálním čase rozměrové změny vzorku a ty zaznamenává do grafu. Změny jsou v závislosti na teplotě ohřevu. Podle způsobu lze metody zařadit do dvou skupin. Absolutní metoda

měření dilatace a relativní metoda měření dilatace. Absolutní metoda je zaměřena na měření přímého smrštění vzorku na teplotě. Výhodou této metody je její přesnost, nevýhodou je její časová náročnost. V relativní metodě měření se využívá porovnání vzorku se vzorkem změřeným absolutní metodou. Vlastnost tepelné roztažnosti určitého materiálu kapaliny charakterizuje materiálový koeficient:

$$b = \frac{1}{V_0} \left( \frac{\Delta V}{\Delta J} \right)_p, \quad (1.6)$$

kde značí:

$V_0$  - objem látky;

$\Delta V$  - diferenciál objemu;

$\Delta J$  - diferenciál teploty;

$p$  - konstantní tlak.

Formovací směsi představují pevné materiály, u kterých lze sledovat teplotní roztažnost. Je známo, že se zvýšením teploty  $DJ$  způsobuje vibrační rozkmit atomů. Průměrný rozestup mezi atomy se zvyšuje a tím se zvyšuje i původní objem  $V_0$  kapaliny o teplotní přírůstek  $DJ$  (při konstantním tlaku  $p$ ). Síly mezi částicemi nelze bezprostředně měřit, a tak se používají fyzikální modely, složité výpočty či experimentální měření.

## 1.5 Plynotvornost formovacích směsí

Vývin plynů ve slévárenské formě je důsledkem působení tekutého kovu na formovací směs, kde probíhají procesy vypařování, uvolnění chemicky vázané vody, oxidace, disociace... Proto na plynotvornost má rozhodující vliv především formovací směs. Formovací směs má schopnost při ohřevu vyvíjet plyny, tuto schopnost vyjadřujeme v  $\text{cm}^3$  na 1g směsi. Při dosažení určité teploty dochází v některých složkách formovacích a jádrových směsí k fyzikálně chemickým přeměnám, které mají za následek uvolňování plynných produktů. Ze složek formovací směsi vykazuje značnou plynatost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, pojiva, organické přísady a další látky.

Na vývin par a plynů při ohřevu formovacích směsí mají vliv zejména tyto fyzikálně chemické děje:

- vypařování vody a jiných kapalných látek
- spalování organických látek
- destilace tuhých i kapalných organických látek
- tepelný rozklad minerálů (příměsí)
- disociace uvolňujících se plynů a průběh některých chemických reakcí za účasti plynné fáze
- rozpínání vzduchu obsaženého v pórech formovací směsi.

Tyto děje mají sice rozdílnou fyzikálně chemickou podstatu i teplotu při níž se začínají uplatňovat, ale díky nerovnoměrnému rozdělení teplot ve slévárenské formě při ohřevu probíhají prakticky současně. Při nevhodných energetických a tlakových podmínkách na rozhraní kov – forma mohou plyny pronikat do taveniny a naopak. K největšímu vývinu plynů dochází v okamžiku styku roztaveného kovu s formou ( jádrem ) při počátku lití. V tuto chvíli je ještě malá tloušťka ztuhlého kovu a tedy i malý metalostatický tlak. Po odlití se uvolněné plyny začnou shromažďovat na hranici formy a taveniny. V důsledku zvyšujícího se tlaku ve formě tlak plynů začne postupně překonávat odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny do taveniny. Uvolnění bubliny nastane při překonání metalostatického tlaku. Tento proces se opakuje až do doby, kdy skončí chemické změny ve formě.

### 1.5.1 Metody sledování plynatosti

Existuje mnoho metod pro sledování plynatosti. Srovnávat lze, ale výsledky, které jsme získali stejnou metodou sledování. Obecně se rozdělují do dvou skupin na přímé ( provozní ) a nepřímé ( laboratorní ).

**A) Metody přímé** – u těchto metod se ohřev formy nebo vzorku provádí přímo tekutým kovem. Objem vzniklých plynů je sledován tlakoměry nebo plynoměry různých typů a konstrukcí. Směs je ohřívána nerovnoměrně vlivem nestejnomořného kontaktu s tekutým kovem, což jsou podobné podmínky jako u reálných forem a odlitků. Proto nám tato metoda umožňuje získat lepší představu o chování formy nebo jádra při odlévání kovu.

Existuje několik druhů přímých metod sledování plynatosti formovacích směsí, které se od sebe různě odlišují (např. druhem forem či velikostí vzorků).



Metoda podle Berga: Na vzorku kruhovitého průřezu o délce 150 mm se měří objem a teplota uvolněných plynů. Vzorek se vkládá do speciálního prstence a zalévá se taveninou až do výše 80 mm.

Metoda podle Spasského: Směs je zaformována ve speciálním prstenci. Odvod plynů z jeho středu je zajištěn pomocí křemenné trubice, která ústí do speciální, hermeticky upravené nádoby o vnitřním objemu 19300 cm<sup>3</sup> a je opatřena speciálním tlakoměrem. Objem uvolněných plynů se vypočítává z tlaku a vnitřního objemu nádoby.

Metoda podle Jašina: Směs je zaformována do speciálního tvaru. Takto připravený vzorek je vložen do kovové formy tak, že tekutý kov přitéká na spodní část vzorku. Po zalití kovem se prstenec uvolní a směs se rozpadá. Podle míry rozpadavosti lze usuzovat míru plynatvornosti.

Ponorná zkouška: U této metody se měří tlak plynu v jádře v závislosti na čase. Na tuto zkoušku se formovací směs připravuje podle předem daných postupů a směs se lisuje s trubičkou přesným tlakem. Vzorek je poté do taveniny ponořován.

Metoda podle Piščeva: Plyny jsou odváděny ze vzorku umístěného ve středu kovové formy pomocí trubky, která je napojena na měřicí přístroj tlaku a objemu.

**B) Metody nepřímé (laboratorní)** - metody nepřímé jsou založeny na sledování malého množství formovací směsi, která je zahřívána v peci. K zahřívání se dříve používala například Marsova pec, ale výsledky měření byly značně nepřesné a při měření docházelo k chybám. V současné době se vyrábějí zařízení určená přímo na sledování plynatosti. To vede k značnému zpřesnění nepřímých metod. Postupně byly vyvinuty metody, při kterých se vzorky zahřívají v peci zvolenou teplotou (600 až 1300 °C).

Metoda podle Ornsta: se vzorek vkládá do trubkové elektrické pece vyhřáté na 1000 °C pomocí speciálně upravené lodičky. Při tom se měří tlak pomocí dvou speciálně upravených manometrů.

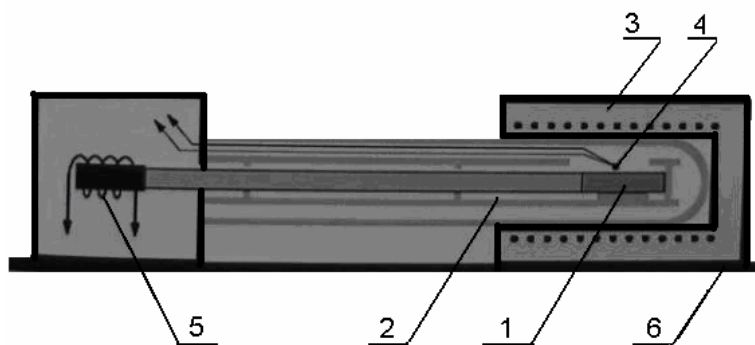
Metoda podle Strohleina - se vzorek vkládá do Marsovy pece vyhřáté na teplotu 1250 °C. Měří se čas a množství vyvinutého plynu.

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo sledovat dilatační změny sádrových formovacích směsí v závislosti na teplotě a také sledování plynatosti sádry. Ke sledování dilatačních změn jsem použil dilatometr, který byl vyvinut katedrou Strojírenské technologie. Na něm byly naměřeno 55 vzorků, jejíž výsledky jsem zpracoval v experimentální části. Také zařízení pro sledování plynatosti bylo navrženo katedrou strojírenské technologie TU v Liberci. Na tomto zařízení bylo naměřeno 48 vzorků. Experimentální část práce zaměřená na plynatost se bude dále zabývat kapitola 2.8.

### 2.1 Charakteristika měřicího zařízení pro měření dilatace

Toto zařízení pro sledování dilatačních změn bylo vyvinuto již před desetiletími. Proto během dalších let procházelo inovacemi, které vedly ke zdokonalení výsledků měření. Na přístroji se samozřejmě prováděli i jiné experimenty, které byli součástí jak výzkumných činností tak diplomových prací studentů. Z diplomových prací mohu uvést TESLA 1981 a Chalupa 2009. Zařízení na sledování dilatačních změn vzorků směsí je složené z indukčního snímače. Ten převádí změnu velikosti délky vzorku na elektrické napětí, které je díky softwaru zaznamenáváno do připojeného počítače. Naměřené hodnoty jsou ukládány do souborů a následně zpracovávány dle požadavků experimentální části. Na obr. 2-1 můžeme vidět schéma zařízení na sledování dilatačních změn.

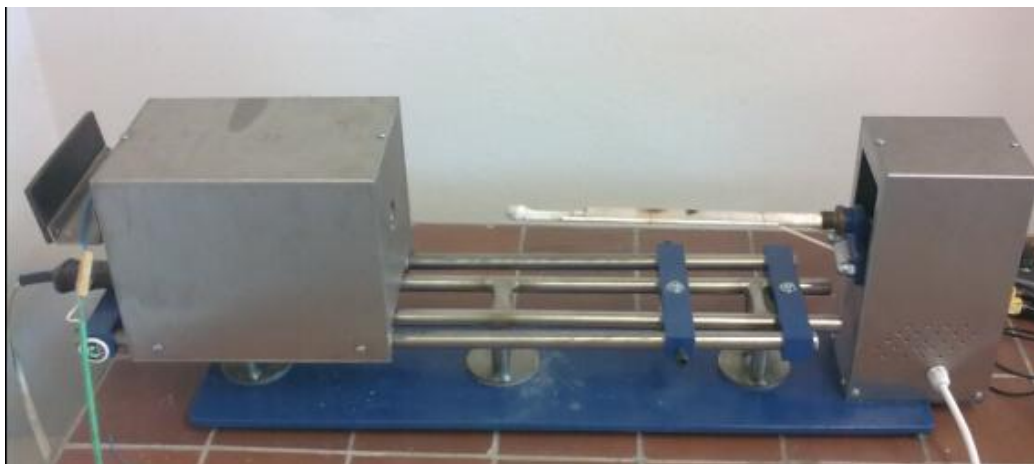


1- měřící vzorek, 2- tyč z křemenného skla, 3-elektrická odporová pec, 4- termočlánek, 5- indukční snímač, 6 rám soustavy.

**Obr. 2-1 Schéma zařízení na sledování dilatačních změn**

### 2.1.1 Popis jednotlivých součástí měřícího zařízení

Zařízení na sledování dilatačních změn, viz obr. 2 - 2, se skládá ze dvou hlavních částí, odporové pece, viz levá část a snímače délkových změn, pravá část zařízení.



**Obr. 2-2 Zařízení pro sledování dilatačních změn formovacích a jádrových směsí**

Odporová pec se skládá z keramické trubkové vyzdívky, přičemž trubka má na mezikruží 16 otvorů s vynutím. Pro vynutí byl použit drát o průměru 0,6mm. Vynutí je propojeno do uzavřeného elektrického obvodu a připojeno na elektrický regulátor Eurotherm E31. Jeho funkcí je nastavení teploty pece na požadovanou hodnotu, kterou snímá za pomoci termočlánku nikl-kobalt. Vnitřek pece je složen ze šamotové vyzdívky, jejíž součástí je keramická trubka. Vše je samozřejmě chráněno keramickými sisalovými destičkami. Na povrchu je také alobalová folie, aby nedocházelo k rychlému ohřevu obalu pece a úniku tepla do okolí. A samozřejmě také proto, aby nebal ohrožena bezpečnosti práce. Teplota pece může totiž dosahovat hodnot i přes 1000 °C. Samotný obal pece je plechový a stejný obal byl použit i pro snímač délkových změn, který je důležitou součástí pece. Indukční snímač reaguje na změnu velikosti vzorku.

Měřený vzorek je uložen v pouzdře trubičky z křemenného skla, viz obr. 2 - 3. Na straně blíže k peci je uchycen napevno. Směrem k indukčnímu snímači se dotýká vložené trubky, která je umístěna na volno. Právě ta přenáší změnu délky měřeného vzorku na indukční snímač. Součástí křemenné trubky jsou také dva termočlánky. Jeden měří teplotu vzorku a teplotu okolí. Druhý z nich měří změnu napětí. Údaje jsou přeneseny pomocí dvou sběrnic, viz obr. 2-4, které jsou USB portem propojené s počítačem.

Zaznamenávány jsou tedy dvě různé fyzikální veličiny a to teplota vzorku  $T_1$  a teplota okolí vzorku  $T_2$  a elektrické napětí  $U$ .



Obr. 2-3 Křemenná trubice



Obr. 2-4 USB Sběrnice Omega  
s termočlánky Daq 56

Na pracovišti, obr. 2-5, jsem měl k dispozici jsem měl počítač, který byl opatřen programem Personál Daq View Plus. Ten byl schopen v požadovaném kroku zaznamenávat a uložit na pevný disk fyzikální veličiny potřebné k určení dilataci měřených vzorků. Přepočtem jednotek napětí změřené indukčním snímačem na jednotku délky se zabývala práce doktora Seidla. Ten experimentálně stanovil konstantu nutnou k přepočtu fyzikálních veličin. Tato konstanta činí 0,004114. Za pomoci této konstanty byly prováděny přepočty jednoty napětí na jednotky délky v této diplomové práci.



Obr. 2-5 Pracoviště na měření dilatace sádrových směsí

## 2.2 Způsob výroby vzorků sádrových formovacích směsí.

Pro experimentální část diplomové práce byly vytvořeny sádrové vzorky. Vzorky byly zhotoveny ve dvou variantách. První z nich byla v poměru 25 dílků sádry a 75 dílků vody. Druhá byla poměru 50 dílků sádry a 50 dílků vody. Pro

zhotovení vzorků jsem použil sádry Hett šedá, Hett bílá a Kittford bílá. K vyhotovení vzorků určených k měření dilatace bylo zapotřebí pomůcek, které byly zapůjčeny katedrou.

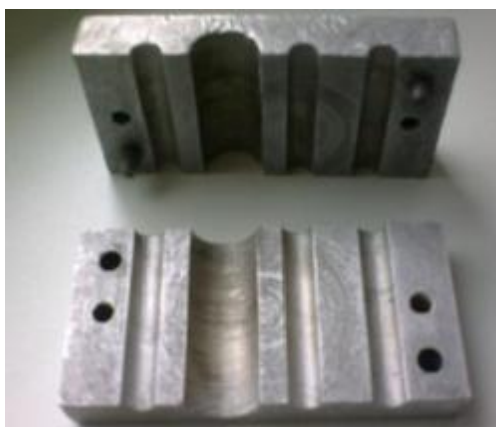
Digitální váhu Radwag WPS 4000/C/2 pro navážení požadovaného poměru vody a sádrové směsi, obr. 2-6, digitální posuvné měřítko Mitutoyo pro přesné změření rozměrů vzorků, obr. 2-7. A samozřejmě formičku pro výrobu vzorků. Formička je zobrazena na obr. 2-8.



Obr. 2-6 Váha Radwag WPS 4000/C/2



Obr. 2-7 Digitální posuvné měřítko Mitutoyo CD-15



Obr. 2-8 Použitá formička pro výrobu vzorků pro měření dilatace

Do připravené misky jsem nejprve nasypal naměřené množství sádry. Poté jsem přidal naměřené množství vody a za důkladného míchání vytvořil kašovitou směs. Tou jsem následně naplnil připravenou formičku. Při každém následném vytváření vzorků bylo nutno formičku pečlivě očistit, aby nedošlo ke znehodnocení vzorků. Dbáno bylo také na uskladnění již připravených vzorků, aby nedošlo k mechanickému poškození nebo aby vzorky před měřením nenavlhly. Ukázka vyrobených vzorků je zobrazena na obr. 2- 9.



Obr. 2-9 Vzorky na kterých byla sledována dilatace

### 2.3 Popis postupu při měření dilatace

Všechna měření byla provedena na dilatometru zkonstruovaném na Technické univerzitě v Liberci a zaznamenávána do přenosného počítače. K měření dilatace bylo zapotřebí také digitální posuvky MITUTOYO CD-15. Ta byla nezbytná k přesnému určení původní velikosti vzorků.

Vzorky byly ohřívány teplem šokem. První sada vzorků byla ohřátá na teplotu 800 °C a druhá část vzorků byla ohřátá na teplotu 1000 °C. Celé měření probíhalo následujícím způsobem: Nejprve byl zapnut elektrický regulátor pece eurotherm E91 který předehřál pec na požadovanou teplotu. V počítači, který byl propojen pomocí USB portu se sběrnici, byl spuštěn program Dag View. Ten sloužil ke zaznamenávání požadovaných fyzikálních veličin  $T_1, T_2$  a napětí  $U$ . V programu bylo nutno nejprve nastavit požadovaný krok záznamu naměřených dat. Ta se ukládala na pevný disk do textového souboru, ze kterého byla následně zpracovávána.



Následně byla digitální posuvkou změřena délka vzorku a ten byl poté vložen do křemenné trubky dilatometru. Poté bylo nutno nastavit pomocí stavícího šroubu nastavit výchozí polohu snímače a to tak, aby se vnitřní křemenná tyčka dotýkala vzorku. Na obr. 2 – 10 je zobrazen vzorek po vyjmutí z pece.



**Obr. 2-10 Sádrový vzorek v křemenné trubici těsně po vyjmutí z pece**

Po vložení křemenné trubice se vzorkem do pece následoval přímý ohřev šokem z teploty pokojové 20 °C na teplotu pece 800 °C nebo 1000 °C . Před tím byl samozřejmě spuštěn program Daq View. Ten v reálném čase zaznamenával závislost hodnoty dilatace na čase, teplotu povrchu vzorku a teplotu v okolí ohříváného vzorku. Při dosažení požadovaných hodnot nutných ke zpracování experimentu bylo zastaveno zaznamenávání hodnot do počítače. Po vychladnutí byl vzorek vyjmut z křemenného pouzdra a celý proces se následně opakoval s novým vzorkem. V tabulce 2-1 sou zobrazeny jednotlivé skupiny měření, celkem proběhlo 55 měření.

**Tab. 2-1 Podmínky měření jednotlivých směsí**

měření	Poměr dílků vody a sádry ve směsi	Typ sádry	Typ ohřevu
měření 1	50/50	Kittfort, Het bílá, Het šedá	800°C
měření 2	75/25	Kittfort, Het bílá, Het šedá	
měření 3	50/50	Kittfort, Het bílá, Het šedá	1000°C
měření 4	75/25	Kittfort, Het bílá, Het šedá	

## 2.4 Způsob zpracování naměřených hodnot

Výsledné hodnoty měření se zapisovaly pomocí programu Daq View do textových souborů, které se ukládaly na pevný disk. Ty obsahovaly teplotu vzorku  $T_1$ , teplotu okolí  $T_2$  a hodnotu dilatace. Teploty se zaznamenaly ve stupních Celsia, zato hodnota dilatace se zaznamenala ve voltech. Hodnoty napětí se pomocí

kalibrační konstanty 0,004114 přepočítávali na hodnoty délkové v mikrometrech[ $\mu\text{m}$ ]. Abychom se vyhnuli zkresleným nebo nepřesným výsledkům, přepočítávali jsme hodnoty délkové na procentuální hodnoty. Nebylo totiž možné vytvořit všechny vzorky stejně dlouhých rozměrů a v tom případě by byly výsledky experimentální části zkreslené. Naměřené hodnoty se převedli do Excelu, kde se dále zpracovávali. Pro názornou představu je přehled veličin uveden v tabulce 2-2, která není kompletní z důvodu velkého množství naměřených hodnot.

**Tab. 2-2 Ukázka naměřených a vypočítaných hodnot z jednoho experimentu z jednoho měření dilatace**

Naměřené hodnoty				Vypočítané hodnoty		
Čas[s]	T1 [°C]	T2 [°C]	U [V]	$\Delta U$ [V]	$\delta$ [ $\mu\text{m}$ ]	% hodnota
0	0	0	0	0	0	0
0,5	29,6692	54,86103	-0,87113	9,76E-05	0,023724	4,74383E-05
1	29,6614	55,30904	-0,87123	0,00022	0,053354	0,000106687
1,5	29,65299	55,63691	-0,87135	0,000305	0,074113	0,000148196
2	29,53021	55,87757	-0,87144	0,000415	0,100778	0,000201515
2,5	29,25605	56,0998	-0,87155	0,000427	0,103768	0,000207494
3	28,97323	56,57281	-0,87156	0,000244	0,059285	0,000118547
3,5	28,82776	56,81629	-0,87137	0,000402	0,097837	0,000195634
4	28,69262	56,22701	-0,87153	0,000549	0,133398	0,000266743
4,5	28,63713	55,57542	-0,87168	0,000756	0,183787	0,000367501
5	28,72532	55,0074	-0,87189	0,001049	0,254934	0,000509767
5,5	29,20921	54,48627	-0,87218	0,003195	0,776616	0,001552922
6	35,46632	58,14149	-0,87433	0,009426	2,291249	0,004581582
6,5	56,2328	81,1331	-0,88056	0,020364	4,950024	0,009898069
7	86,58324	133,9784	-0,8915	0,028449	6,915192	0,013827619
7,5	130,9043	200,075	-0,89958	0,037266	9,05824	0,018112858
8	180,0487	257,0862	-0,9084	0,05435	13,21091	0,026416545
8,5	223,4454	306,5565	-0,92548	0,072909	17,72224	0,035437395
9	260,836	349,9472	-0,94404	0,088384	21,48367	0,042958739
9,5	290,9843	387,0825	-0,95951	0,100688	24,47443	0,04893907
10	314,914	419,0132	-0,97182	0,11076	26,92275	0,053834736
10,5	333,91	445,9352	-0,98189	0,119138	28,95907	0,057906552
11	349,1758	468,4184	-0,99027	0,126247	30,68712	0,061361962
11,5	361,613	486,8589	-0,99738	0,132466	32,19888	0,064384887

**Poznámka:** Popis tabulky: čas [s] daný okamžik záznamu hodnot  $T_1$ ,  $T_2$  a  $U$  [V];

$U$  [V] - naměřená hodnota napětí, která odpovídá změně rozměrů vzorku;

$T_1$  [°C] - teplota okolí vzorku;

$T_2$  [°C] - teplota vzorku;

$\delta$  [ $\mu\text{m}$ ] - hodnota dilatace;

% hodnota - procentuální prodloužení vzorků.



Pro určení procentuálního prodloužení vzorků bylo nutné provést několik mezivýpočtů. Jsou jimi změna napětí  $\Delta U$ ,  $\delta$ . Změna napětí  $U$  je vypočtena z rozdílů počáteční hodnoty napětí indukčního snímače a naměřené hodnoty, dle vztahu:

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (2.1)$$

kde značí:  $\Delta U$  - je rozdíl napětí;

$U_2$  - je výchozí hodnota napětí dle indukčního snímače;

$U_1$  - je počáteční hodnota napětí indukčního snímače.

Hodnota dilatace  $\delta$  [ $\mu\text{m}$ ] byla vypočítána z podílu hodnot napětí indukčního snímače a kalibrační konstanty indukčního snímače podle vztahu:

$$d = \frac{\Delta U}{0,004114}, \quad (2.2)$$

Hodnotu dilatace na procentuální hodnotu jsem přepočítal podle vztahu:

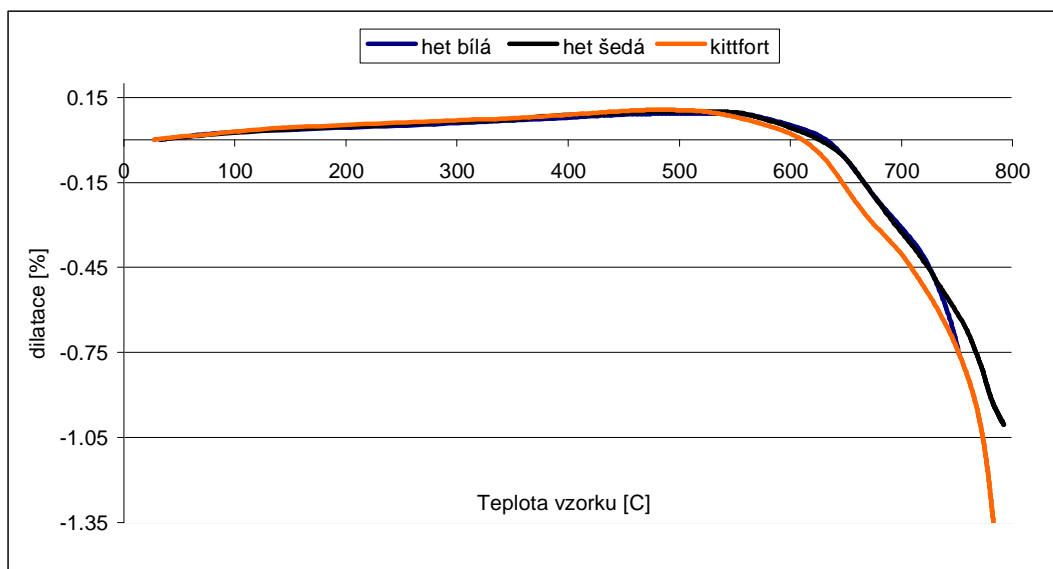
$$\%dilatace = \frac{100 * d}{l}, \quad (2.3)$$

kde značí:  $d$  - je hodnota dilatace v [ $\mu\text{m}$ ];

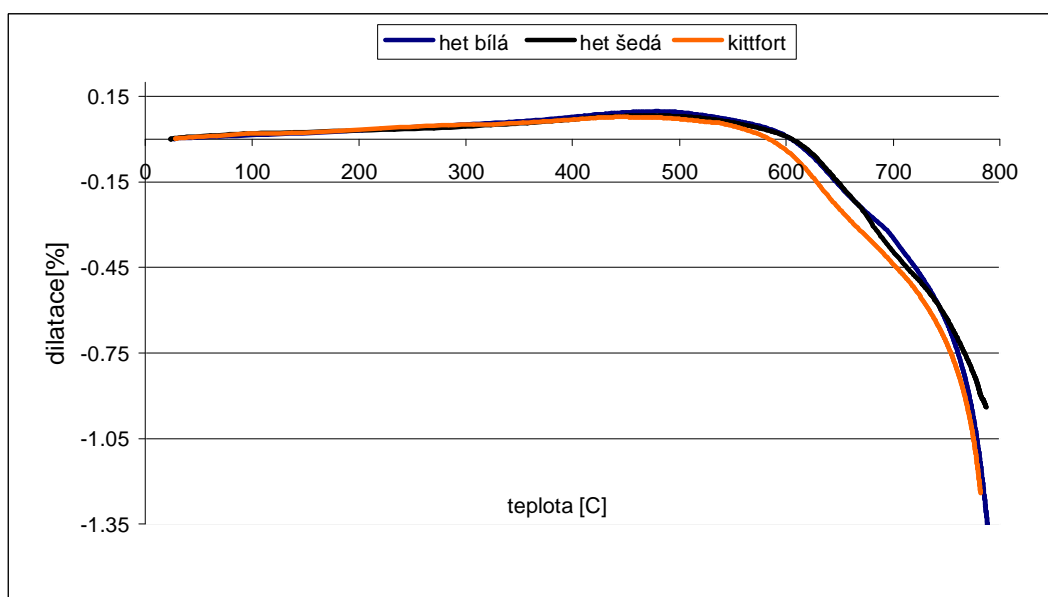
$l$  - je původní délka vzorku v [ $\mu\text{m}$ ].

Tímto způsobem byly přepočítány hodnoty všech prováděných experimentů a byly zkonstruovány trácké závislosti odpovídající jednotlivým vzorkům sádrových směsí podrobených měření dilatace. Na obr. 2-11 až 2-14 jsou uvedeny grafické závislosti sledovaných vzorků.

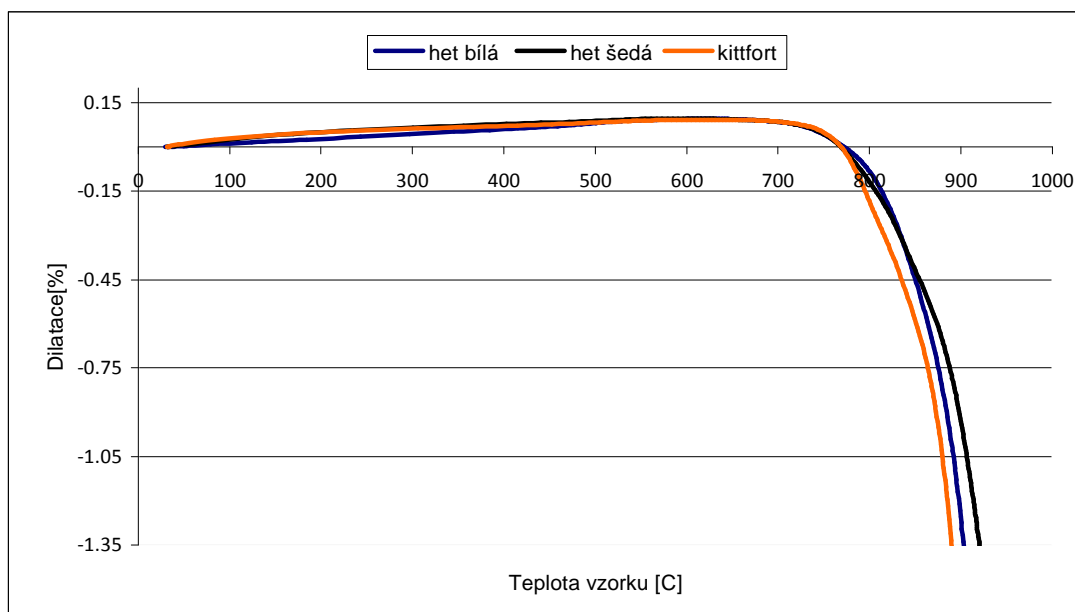
## 2.5 Grafické znázornění průměrných hodnot dilatace v závislosti na teplotě vzorku všech skupin směsí



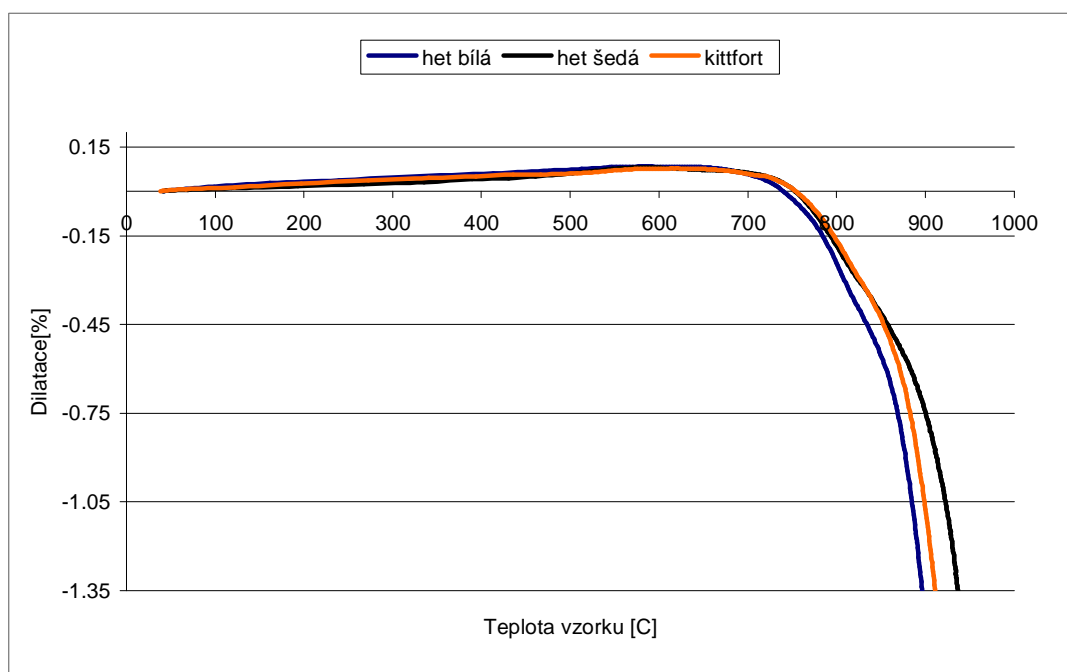
Obr. 2-11 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800°C při poměru voda- sádra 75:25



Obr. 2-12 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800°C při poměru voda- sádra 50:50



**Obr. 2-13 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 1000°C při poměru voda- sádra 75:25**



**Obr. 2-14 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 1000°C při poměru voda- sádra 50:50**

## 2.6 Vypočítané součinitele teplotní roztažnosti

Jedním z úkolů při měření dilatačních změn sádrových směsí bylo zjištění hodnot součinitelů teplotní roztažnosti daných směsí. Hodnoty byly vypočteny dle vzorce 2.4 a jsou uvedeny v tabulce 2 - 3, kde jsou též zaznamenány teploty vzorků, hodnoty dilatace a hodnoty součinitele teplotní roztažnosti K. Konkrétně se jedná o měření směsi bílé sádry Het v poměru voda sádra 75/25. Výpočet byl proveden dle následujícího vzorce:

$$a = \frac{d}{l_o(T - T_o)}, \quad (2.4)$$

kde značí:  $a$  - součinitel teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ];

$d$  - dilatace vzorku po ohřevu [ $\mu m$ ];

$l_o$  - počáteční délka vzorku. [cm];

$T$  - teplota při dané dilataci [ $^{\circ}C$ ];

$T_o$  - předchozí teplota intervalu [ $^{\circ}C$ ].

**Tab. 2-3 Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti sádry při postupném ohřevu na 1000  $^{\circ}C$**

Teplota T2 [ $^{\circ}C$ ]	Průměrná dilatace vzorků [%]	Absolutní hodnota dilatace [%]	Dilatace [mm]	Součinitel teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ]
29.534295	0	0	0	0
36.19273	0.000726031	0.000726031	0.000363016	1.1792E-06
93.48952667	0.005221221	0.005221221	0.002610611	9.11259E-07
153.3278667	0.013528559	0.013528559	0.006764279	2.26085E-06
222.7222333	0.024470446	0.024470446	0.012235223	3.52629E-06
285.9309833	0.03454288	0.03454288	0.01727144	5.46489E-06
340.37005	0.043450513	0.043450513	0.021725257	7.98149E-06
383.5325833	0.051793586	0.051793586	0.025896793	1.19997E-05
441.1688667	0.062222874	0.062222874	0.031111437	1.07958E-05
507.3440833	0.08145025	0.08145025	0.040725125	1.23083E-05
545.1200333	0.090059883	0.090059883	0.045029941	3.43037E-05
600.2812667	0.094987128	0.094987128	0.047493564	1.72199E-05
652.2687333	0.094147544	0.094147544	0.047073772	1.81097E-05
700.54075	0.084622632	0.084622632	0.042311316	1.75304E-05
751.3702	0.039363202	0.039363202	0.019681601	7.74417E-06
801.2195833	-0.086695757	0.086695757	0.043347879	1.73915E-05
850.2707333	-0.442458637	0.442458637	0.221229319	9.02035E-05
903.72295	-1.355198997	1.355198997	0.677599498	0.000241549
950.2853667	-3.690485315	3.690485315	1.845242657	0.000786875

V následující tabulce 2 - 4 jsou uvedeny hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro dané typy sádrových směsí a dané teplotě.

**Tab. 2-4 Hodnoty součinitele teplotních roztažností**

Typ sádry	Poměr voda sádra (75-25) [1]	Poměr voda sádra (50-50) [1]
Kittfort	6.91324E-05	4.32405E-05
Het šedá	2.60144E-05	3.94223E-05
Het bílá	6.77555E-05	6.60493E-05

## 2.7 Vyhodnocení dílčích měření

Obrázek 2 - 11 ukazuje závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800 °C při poměru voda- sádra 75:25. Z průběhu dilatací je zřejmé, maximální hodnoty dosáhly vzorky u teploty 500 °C. Nejvyšší hodnoty dosáhla sádra Kittfort. Přibližně po překročení teploty 550 °C došlo k degradaci sádrových směsí a začalo jejich smršťování. Vzorek sádry Kittfort také dosáhl své původní velikosti při nejnižší teplotě, a to 620°C. Poté již docházelo k jasné degradaci měřených vzorků a jejich zborcení.

Obrázek 2 - 12 ukazuje závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800°C při poměru voda- sádra 50:50. Zde maximální hodnoty dosáhla sádra Het bílá. Z grafu je patrné, že při stejné teplotě ale s nižším obsahem vody v sádrových směsích dochází dříve k jejím degradacím.

Obr. 2 - 13 ukazuje závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 1000 °C při poměru voda- sádra 75:25. Obdobně jako na obrázku 3 - 14, kde byl poměr vody a sádry 50:50, dosahuje nevyšší hodnoty dilatací Het šedá. Nicméně jak je z grafů patrné, měřené hodnoty jednotlivých směsí se téměř nelišily. Maximální hodnoty teplot, ve kterých vzorky dosáhly nejvyšší dilatace, se oproti ohřevu na 800 °C posunuly k teplotám 650 °C.

Tabulka 2 - 14 zobrazuje hodnoty součinitele teplotních roztažností vybraných formovacích směsí. Zde se můžeme opřít o tabulkové hodnoty roztažnosti sader. Tyto hodnoty se při teplotách 100°C pohybují v řádech  $25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Údaj koresponduje s hodnotou v tabulce 2 - 3 při 100°C. V tabulce 2 - 4 jsou zprůměrnované hodnoty teplotních roztažností a proto jsou v řádech nižší než při 100 °C, kde nedocházelo k degradacím vzorků ze sádrových směsí.

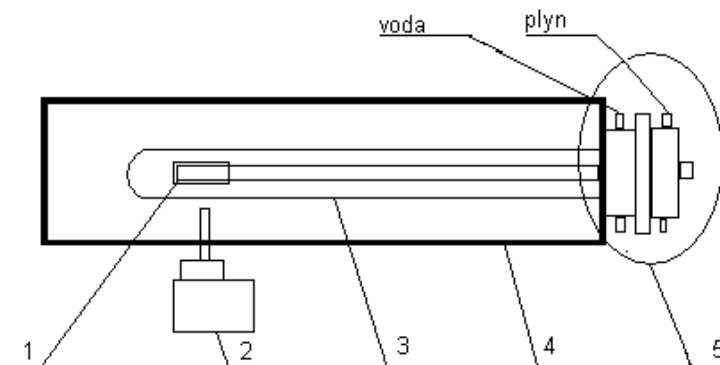
## 2.8 Sledování plynatosti sádry

V souladu s měřením dilatačních vlastností vzorků sádry bylo provedeno též sledování plynotvornosti vzorků sádry.

### 2.8.1 Charakteristika měřícího zařízení

Také zařízení pro sledování plynatosti je během dvacetiletého vývoje dále zdokonalováno. Funkce měřícího zařízení byla podrobně ověřena a některé výsledky podrobně zpracovány v diplomových pracích BAUEROVÁ [1], JENČOVSKÝ [5], avšak od té doby prošlo zařízení několika konstrukčními a i metodickými změnami. Principem ale stále zůstává snímání tlaku uvolňujících se plynů spalováním vzorku směsi v elektrické peci. Metoda vychází z metodiky měření plynatosti na přístroji PDG firmy +GF+. Vzorek zkoušené směsi se ohřívá sálavým teplem a na měřícím zařízení sledujeme tlak uvolněných plynů v daném časovém okamžiku. Prostor pece je uzavřený a je spojen pouze s měřicí soustavou.

Zařízení umožňuje měření plynatosti do 1300 °C. Obr. 2-15. Vyrobený vzorek je uložen v molybdenové lodičce a je vložen do zatavené křemenné trubice. Ta je umístěna v elektrické odporové peci a již od prvních okamžiků dochází k výraznému ohřevu vzorků.

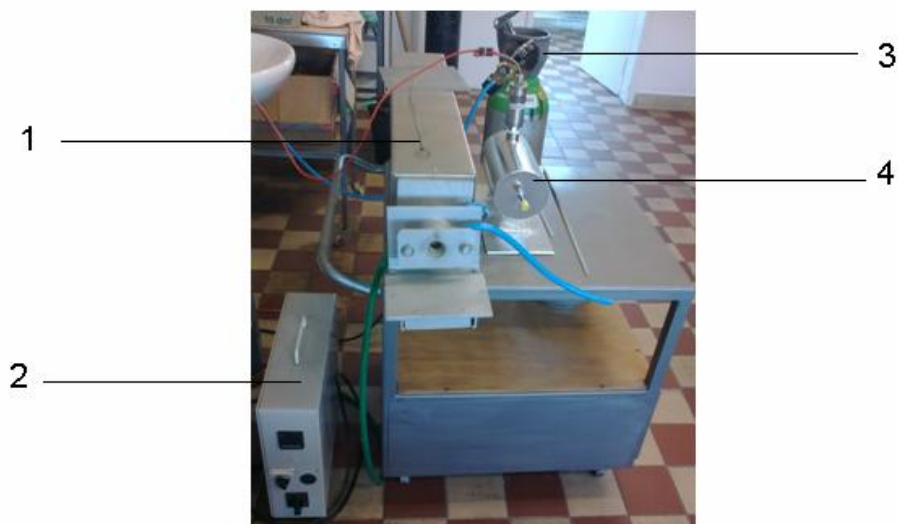


1 - lodička z molybdenového plechu, 2 - regulátor pece, 3- křemenná zatavená trubice, 4- elektrická odporová pec, 5 - uzavírací hlavice pece s chlazením.

**Obr. 2-15 Zařízení na měření plynatosti**

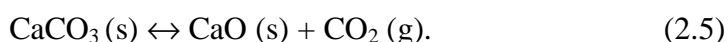
Nejprve je ale nutné provést kontrolu měřícího zařízení, abychom zajistili přesnost a správnost měřícího zařízení. To je například kontrola těsnosti propojovaných hadic, spuštění chladicího okruhu, správné nastavení datových vstupů, jednotek a rozsahů programu DaqView. Po skončení měření necháváme chladicí okruh stále zapnutý. Vypnout ho můžeme až po vychladnutí pece. Provádí

se to z důvodu bezpečnosti a zachování životnosti uzavírací hlavice. Sestava pracoviště je zobrazena na obrázku 2-16.



Obr. 2-16 Sestava pracoviště

**Kalibrace zařízení** - změny hodnot výstupního napětí jsou zobrazeny pomocí softwaru DaqView ve Voltech. Bylo tedy nutné určit pro další výpočty kalibrační konstantu pomocí metody rozkladu  $\text{CCO}_3$ . Tato metoda dobře vystihuje místní podmínky, tj. malé změny tlaku měřené plynatosti a k tomu odpovídající změny objemu. Kalibrace byla provedena na základě rozkladu čistého uhličitanu vápenatého  $\text{CaCO}_3$ , který se rozkládá při teplotách 850 - 984 °C, podle rovnice:



Pro uplatnění kalibrační křivky bylo nutné určit objem uvolněných plynů ze zkušební vzorku čistého  $\text{CaCO}_3$ . Objem plynů byl stanoven z rovnice:

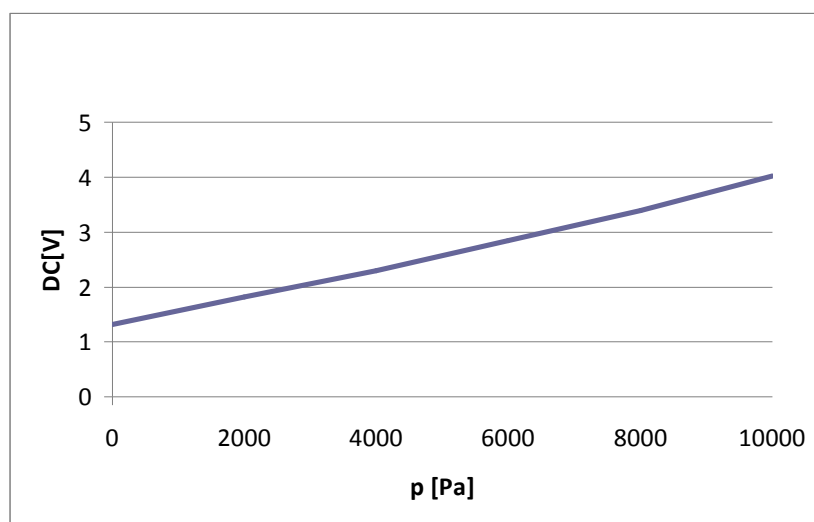
$$V = \frac{V_m \cdot m}{M_{\text{CaCO}_3}}, \quad (2.6)$$

Kde značí:  $V_m$  - molový objem plynu [ $22,4 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ ];

$M$  - hmotnost  $\text{CaCO}_3$  [g];

$M_{\text{CaCO}_3}$  - molární hmotnost  $\text{CaCO}_3$  [ $100 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ].

Na obrázku 2 - 17 je uvedena kalibrační křivka daného měřícího zařízení zjištěná pomocí tepelného rozkladu vápence.



Obr. 2-17 Kalibrační křivka zjištěná pomocí rozkladu  $\text{CaCO}_3$

Průměrná kalibrační konstanta, která nám z měření vyšla se použila pro další výpočty měření plynatosti, tedy  $1\text{Pa} = 0,000311\text{ V}$ . Po kalibraci bylo již možné přistoupit k vlastnímu měření plynatosti směsí. Změřený výsledný objem uvolněných plynů lze počítat na základě izotermických podmínek ( $T=\text{konst.}$ ) ze vztahu:

$$p \cdot v = \text{konst.} \quad (2.7)$$

Pro podmínky měřícího zařízení je možno rovnici upravit do tvaru:

$$\Delta V \cdot p_A = \Delta p \cdot V_0, \quad (2.8)$$

kde značí:  $\Delta V$  - změna objemu uvolněných plynů ze směsí ( $\text{ccm}^3$ );

$p_A$  - atmosferický tlak ( $9,7 \cdot 10^5\text{ Pa}$ );

$\Delta p$  - změna tlaku uvolněných plynů ( $\text{Pa}$ );

$V_0$  - objem měřící soustavy ( $1995\text{ ccm}^3$ ).



### 2.8.2 Výroba vzorků a postup měření plynatosti vybraných směsí

Stejně tak jako při sledování dilatačních změn i nyní byly použity tři typy sáder, tedy-Het bílá, šedá a Kittfort bílá. Sledování plynatosti sádry můžeme rozdělit do dvou skupin:

Sledování plynatosti při koncentraci 50% vody a 50% sádry za teplot 800 °C a 1000°C o váze vzorku 1g.

2. Sledování plynatosti při koncentraci 75% vody a 25% sádry za teplot 800 °C a 1000°C o váze vzorku 0,5g. Důvod váhy vzorku 0,5 g je čistě technický. Vzhledem k velikosti lodičky z molybdenového plechu a křemenné zatavené trubice nebylo možné při této koncentraci pracovat se vzorky 1g. Vzorky byly naváženy na Váze LECO EB 25 zobrazené na obrázku 2-18. Výhodou váhy je její přesnost na 0,001g.



Obr. 2-18 Váha Leco EB25

Samotná příprava vzorků probíhala odlišně od výroby vzorků pro měření dilatačních změn. Vzhledem k obdélníkovému tvaru lodičky byla vytvořena sádrová břečka vždy s požadovanou koncentrací, ze které se vytvořil jednolitý plát, který na vzduchu zaschl. Plát byl poté nařezán na daný počet vzorků tak, aby se vešel do lodičky z molybdenového plechu. Podmínkou bylo splnit kritérium a pracovat se vzorky o hmotnosti 1g a 0,5g.

Nejprve se elektrická odporová pec předehřála na požadovanou teplotu a přes sběrnici byl připojen počítač s programem DaqView, který zaznamenával hodnoty napětí v jednotkách Volt.

Následně byl vzorek o dané váze vložen do lodičky a zasunut do křemenné zatavené trubice. Velký pozor jsme museli dát na to, aby zasunutí probíhalo přibližně stejně vzhledem k předehřáté peci. Důraz se kladl též na dotažení zátky z umělé hmoty, která bránila uniku tlaků ze systému.

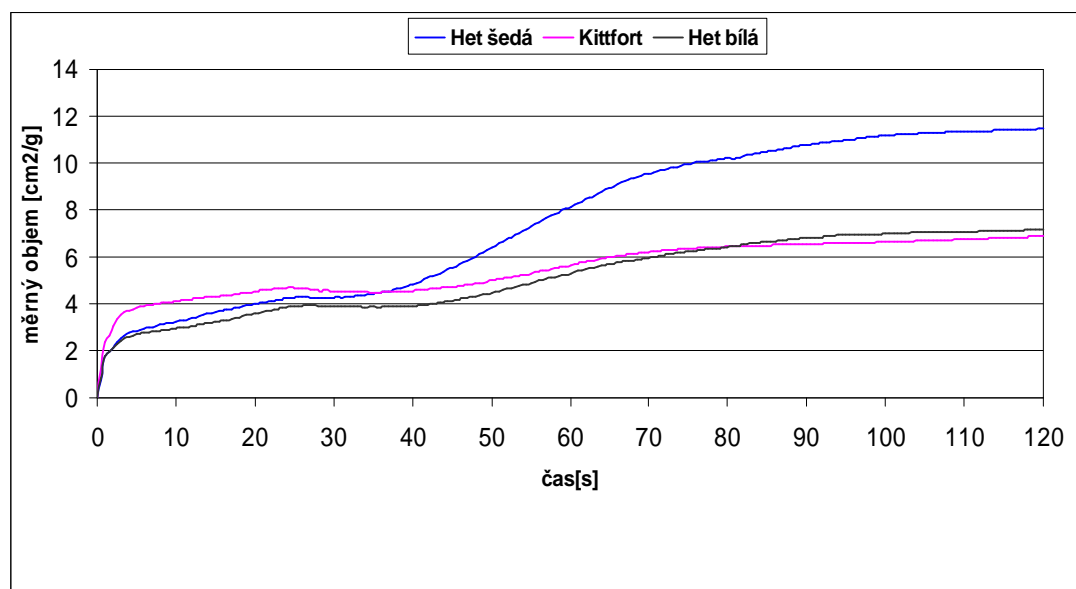
## 2.9 Vyhodnocení záznamů plynatosti

Při experimentálním měření se ukázalo, že postačující doba měření je 120s. V tomto čase byly sledovány vlastnosti směsí. Celkem bylo provedeno 48 pokusů, ze kterých bylo provedeno vyhodnocení a posouzení výsledků. Každý vzorek byl proměřen čtyřikrát pro každou koncentraci a ze získaných hodnot byl proveden průměr. V této kapitole jsou uvedeny hodnoty objemů plynů(V) v závislosti na čase (t). Tato měření jsou graficky zobrazena na obrázcích 2 - 19 až 2 - 22 pro dané poměry vody a sádry při dané teplotě.

V tabulkách 2 - 5 až 2 - 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti. Z praktických důvodů jsou zobrazeny pouze vybrané časové úseky. Na obrázcích 2 - 19 až 2 - 22 jsou uvedeny průměrné hodnoty plynatosti pro vybrané časové úseky pro sádru s daným poměrem vody a sádry v závislosti na čase při dané teplotě.

**Tab. 2-5 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C**

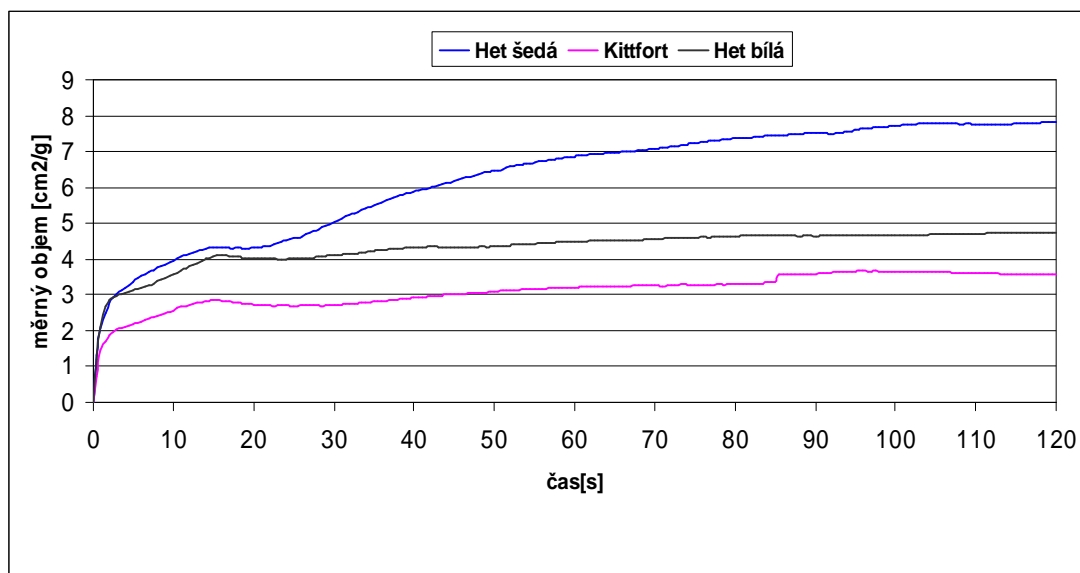
Hodnocení plynatosti cm <sup>3</sup> *g <sup>-1</sup>			
čas	Typ sádry		
[s]	het šedá	het bílá	kittfort
0	0	0	0
0.5	0.739782	0.817762	1.235865
1	1.775629	1.772748	2.345646
1.5	1.912082	1.927151	2.675491
2	2.121492	2.13212	3.045867
10	3.227592	2.958562	4.10913
20	3.991691	3.577525	4.525442
30	4.25128	3.878225	4.535092
40	4.835115	3.893086	4.553235
50	6.388018	4.471711	4.972634
60	8.13952	5.296609	5.641783
70	9.537249	5.940469	6.195321
80	10.22106	6.429734	6.449316
90	10.76475	6.820374	6.549871
100	11.17218	6.97439	6.63132
110	11.34936	7.087297	6.751947
120	11.46356	7.171641	6.873153



**Obr. 2-19 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C**

**Tab. 2-6 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C**

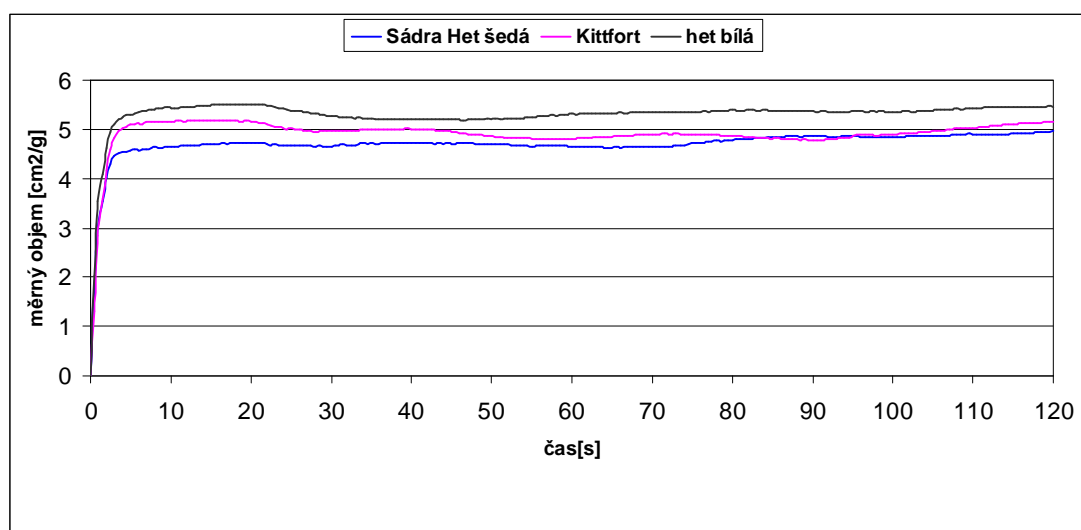
hodnocení plynatosti [cm <sup>3</sup> *g <sup>-1</sup> ]			
čas	Typ sádry		
[s]	het šedá	het bílá	kittfort
0	0	0	0
0.5	1.331691	1.204596	0.698095
1	2.08248	2.127161	1.45004
1.5	2.477564	2.65966	1.701331
2	2.797373	2.85749	1.89858
10	3.970648	3.581643	2.578532
20	4.313617	4.031343	2.726181
30	5.032558	4.091561	2.708424
40	5.879848	4.329343	2.9215
50	6.473531	4.368522	3.09115
60	6.869964	4.482782	3.213128
70	7.070301	4.568862	3.260221
80	7.366563	4.647608	3.305963
90	7.534283	4.64201	3.595666
100	7.721112	4.662276	3.65717
110	7.774767	4.718826	3.611107
120	7.818968	4.737741	3.574307



**Obr. 2-20 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C**

**Tab. 2-7 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 800 °C**

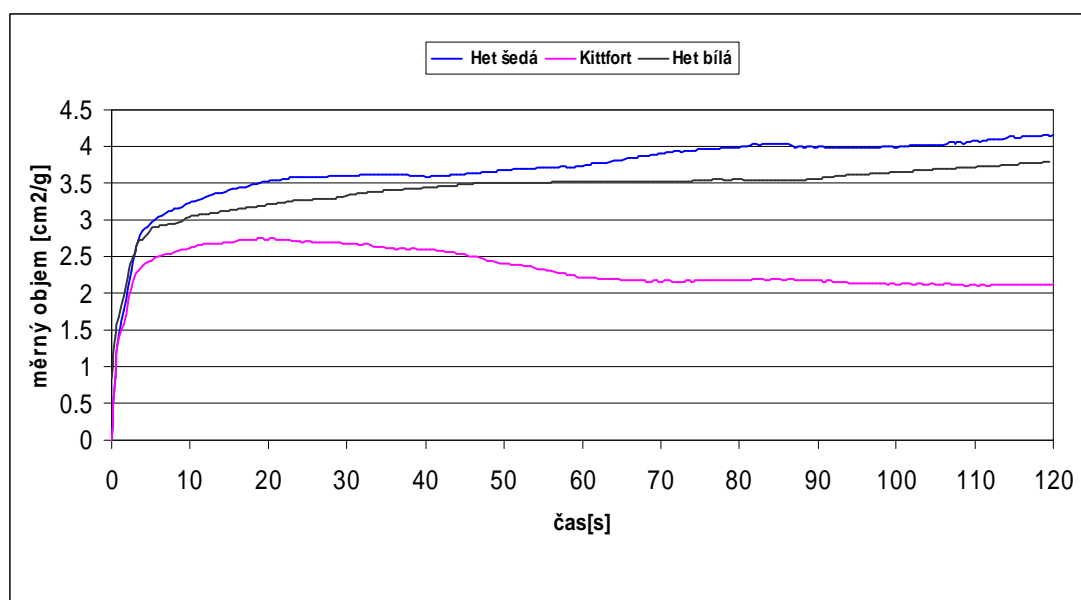
hodnocení plynatosti cm <sup>3</sup> *g-1			
čas	Typ sádry		
[s]	het šedá	het bílá	kittfort
0	0	0	0
0.5	1.865004	2.044907	1.300827
1	2.995046	3.528731	2.834835
1.5	3.543564	4.087673	3.596045
2	4.00967	4.612839	4.166567
10	4.646586	5.433494	5.14806
20	4.728998	5.500852	5.140855
30	4.653919	5.269054	4.969724
40	4.725523	5.199959	5.003435
50	4.700626	5.20073	4.872449
60	4.650638	5.31055	4.802968
70	4.638479	5.3478	4.893551
80	4.77667	5.386787	4.872449
90	4.868346	5.369416	4.777233
100	4.854836	5.35745	4.898955
110	4.907334	5.431371	5.031021
120	4.963112	5.459163	5.151456



**Obr. 2-21 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 800 °C**

**Tab. 2-8 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 800 °C**

hodnocení plynatosti [cm <sup>3</sup> *g <sup>-1</sup> ]			
čas	Typ sádry		
[s]	het šedá	het bílá	kittfort
0	0	0	0
0.5	0.864851	0.853851	0.861377
1	1.429003	1.427003	1.375924
1.5	1.767339	1.670314	1.576455
2	2.056268	1.956268	1.848975
10	3.233204	3.013558	2.620994
20	3.522131	3.196486	2.737763
30	3.594315	3.312435	2.680633
40	3.582156	3.43258	2.591851
50	3.669973	3.502533	2.41062
60	3.737138	3.513272	2.210861
70	3.906017	3.524011	2.161839
80	3.986885	3.554332	2.17284
90	3.999238	3.555588	2.16705
100	3.986692	3.644535	2.123238
110	4.068526	3.714838	2.107412
120	4.160606	3.785141	2.117685



**Obr. 2-22 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 800 °C**

### 3 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přinášejí dílčí informace o slévárenských vlastnostech sádrových formovacích směsí. Tyto směsi slouží pro výrobu forem určených ke zhotovení rozměrově přesných odlitků s velkou hladkostí povrchu.

#### 3.1 Diskuse výsledků z měření dilatací formovacích směsí

Pro měření dilatačních vlastností sádrových směsí je nutný slévárenský, resp. speciálně upravený dilatometr. Protože se ve slévárenském odvětví nesetkáváme z důvodu finanční náročnosti se sériovou výrobou těchto zařízení, je každý takto vyrobený dilatometr unikátní. Stejně tak je tomu i na Katedře strojírenské technologie - FS, TU v Liberci, kde mohu velmi pozitivně hodnotit kvalitu dilatometrů, které se během desetiletí zdokonalily a zkvalitnily výsledky měření sledovaných dilatací. I tak lze konstatovat, že dílčí měření jsou velmi časově náročná, hlavním důvodem je potřeba uvést pec do stavu pokojové teploty, která byla výchozí teplotou pro daný vzorek.

Měření dilatace sádrových forem probíhalo za postupného ohřevu. Z praktického hlediska se odlévání do sádrových forem blíží více šokovému ohřevu, kdy je naší snahou naplnit formu taveninou v co nejkratším čase. Nicméně z experimentu lze usoudit, že rozdíl by byl především ve strmějším nárůstu dilatace. Jak můžeme s průběhu měření vyčíst, s rostoucí teplotou u jednotlivých měření dilatace roste i součinitel teplotní roztažnosti. Směrodatné a v praxi zavedené jsou ale pro nás údaje součinitele teplotní roztažnosti s hodnotami kolem teplot 110 °C. Do těchto teplot dochází k uvolnění volné vody z krystalové mřížky směsi a s rostoucí teplotou se také urychluje proces dehydratace. Jak je z grafů patrné, při měření vzorků s ohřevem na 800 °C dochází k degradaci vzorků při teplotách 500 °C, při teplotě pece 1000 °C se hodnota degradace posunuta k teplotám 650 °C. Poté již můžeme pozorovat porézní strukturu vzorků. Je k diskusi, zda k jasné degradaci forem sádrových směsí dochází již v momentě nad teplotami 500 °C a 650 °C, či ve chvíli, kdy se rozměry měřeného vzorku dostaly pod svoji původní hodnotu.

#### 3.2 Diskuse výsledků plynatosti u různých koncentrací sádrových vzorků

Naměřené hodnoty plynatosti přinášejí provozní jistoty, které jsou potřebné pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování při výrobě jader i forem. Právě plynatost

je důležitou vlastností směsí a výrazně ovlivňuje kvalitu odlitků nejen u sádrových forem. Ve slévárenské praxi sádrové formy a jádra mohou obsahovat velké množství dalších látek, které se při tepelném zatížení rozkládají a tím přispívají k tvorbě plynů. Vzniká dehydratace sádrové formy, dochází k tepelnému rozkladu vody, tepelná disociace uvolněných plynů atd.

Dle měření můžeme nyní konstatovat, že nejvyšší nárůst vývinu uvolněných plynů nastává na počátku měření. Tedy i na začátku odlévání. Je proto velmi důležité, aby tlak uvolněných plynů byl menší než tlak taveniny.

Vybraná metoda sledování plynatosti je pouze orientační. Pouze posuzuje, zda daný vzorek uvolňuje více či méně plynů při stejných podmínkách. Dodnes totiž nebyla vyvinuta taková metoda měření plynatosti, která by posuzovala plynatost s ohledem na tvar a velikost dutiny slévárenské formy. Přímé metody měření se tomuto požadavku přibližují především proto, že dokáží využít teplotu roztaveného kovu. Přesto před nimi ale dostávají přednost metody nepřímé, především kvůli menším nárokům na zařízení a přípravu vzorků.

Pozornost se jim začala věnovat i na pracovišti TU v Liberci, kde bylo zkonstruováno zařízení, které umí zaznamenat nejen maximální hodnotu uvolněného plynu, ale celý časový průběh plynatosti.

Zjištěná hodnota plynatosti sádry Het šedá v poměru 75% vody a 25% sádry po zahřátí v čase ve 120 [s] při teplotě 1000°C činí 7,82 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 4,96 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>].

Zjištěná hodnota plynatosti sádry Het šedá v poměru 50% vody a 50% sádry po zahřátí v čase ve 120[s] při teplotě 1000°C činí 11,46 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 4,1 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>].

Zjištěná hodnota plynatosti sádry Het bílá v poměru 75% vody a 25% sádry po zahřátí v čase ve 120[s] při teplotě 1000°C činí 4,74 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 5,46 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>].

Zjištěná hodnota plynatosti sádry Het bílá v poměru 50% vody a 50% sádry po zahřátí v čase ve 120[s] při teplotě 1000°C činí 7,17 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 3,79 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>].

Zjištěná hodnota plynatosti sádry Kittfort v poměru 75% vody a 25% sádry po zahřátí v čase ve 120[s] při teplotě 1000°C činí 3,57 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 5,12 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>].



Zjištěná hodnota plynatosti sádry Kittfort v poměru 50% vody a 50% sádry po zahřátí v čase ve 120[s] při teplotě 1000°C činí 6,87 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Při teplotě 800°C činí 2,12 [cm<sup>3</sup>\*g<sup>-1</sup>]. Z naměřených hodnot lze odečíst, že nejvyšší plynatost vykazuje sádra Het šedá, ať už na teplotách 800°C tak 1000°C. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u sádry Kittfort. Proto usuzuji, že z vybraných sader je pro výrobu slévárenských forem nevhodnější.

I přes kvalitu měřících zařízení, které jsou na Katedře strojírenské technologie - FS, TU v Liberci k dispozici, by bylo nesporným přínosem provést několik úprav, které by zjednodušily a zkvalitnily dílčí měření. Při měření dilatace například utěsnění křemenné trubice, kde v případě rozpadu vzorku docházelo ke znečištění měřící soustavy a tím k možnému znehodnocení výsledků. Při měření plynatosti vzorků ze sádrových směsí by mohl být přínosem lepší systém utěsnění, kdy bylo nutností zátka z umělé hmoty dobře dotáhnout. Únik plynů, vyšší či nižší tlak by značně znepřesnil výsledky měření.

## 4 ZÁVĚR

Diplomovou práci na téma „Sledování plynatosti a teplotní dilatace sádrových směsí“ můžeme rozdělit do dvou částí. Teoretická a experimentální část.

Teoretická část byla zaměřena na vlastnosti formovacích směsí, na pojiva první druhé, třetí a čtvrté generace. V této části jsou dále popsány vlastnosti sádry, její složení a typy. Popsána byla veličina součinitele teplotní roztažnosti a plynotvornost formovacích směsí. V experimentální části diplomové práce se zabývá sledováním dilatace a plynatosti sádrových směsí. Jsou zde popsány měřicí zařízení Katedry strojírenské technologie – FS, postupy přípravy vzorků nutných k provedení experimentu a vyhodnocení výsledků měření.

V diplomové práci můžeme dospět k závěrům:

1. Veškerá měřicí zařízení pro sledování dilatačních změn a pro měření plynatosti, na kterých byla prováděna měření v rámci řešení této diplomové práce, splňovala s dostatečnou přesností nutné parametry pro vyhodnocení výsledků.

2. Při provádění experimentálních měření je důležitá příprava vzorků. Je třeba, aby byly připravovány za stejných podmínek (teplota 20 °C, tlak 0,1Mpa).

3. Největší dilataci vykazovaly směsi ze sádrových forem s poměrem 75% dílků vody a 25% sádry. Při měření na 1000 °C činila nejvyšší hodnota dilatace 0,095% na teplotě 608 °C u sádry Het šedá. Při měření na 800 °C činila nejvyšší hodnota dilatace 0,10% při teplotě 476 °C u sádry Kittfort. Nižší hodnoty dilatace vykazovaly směsi s poměrem 50% vody a 50% sádry. Vůbec nejnižší hodnotu vykazala sádra Kittfort při měření na 800 °C a to 0,077%.

4. Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti sádrových forem odpovídaly již známým tabulkovým hodnotám. Nejvyšší hodnoty vykazala sádra Het bílá v poměru 50% dílků sádry a 50% dílků vody s hodnotou  $6.77 \cdot 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ . V poměru 25% dílků sádry a 75% dílků vody hodnotu  $6.6 \cdot 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ . Naopak nejnižší hodnotu vykazala sádra Het šedá a to  $2.6 \cdot 10^{-5}$  v poměru 25% dílků sádry a 75% dílků vody.

5. Hodnota plynotvornosti formovacích směsí byla jako nejnižší zaznamenána i sádry Kittfort, kde při teplotě 1000 °C činí  $3,57[\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$  a při teplotě 800 °C činí  $5,12[\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}]$ . Tato nízká hodnota tedy potvrzuje obecně známý fakt, že látky na bázi anorganických pojiv vykazují nižší hodnoty plynatosti než látky na bázi organických pojiv.

## Literatura

- [1] BAUEROVÁ, Martina. Měření plynatosti jádrových směsí s pryskyřičnými pojivy. *Diplomová práce 1992*. KSP-FS, TU v Liberci
- [2] JELÍNEK, Petr. Slévárenské formovací směsi III. část, *Skripta*. VŠB Ostrava 1984.
- [3] GREGEROVÁ, Miroslava. Petrografie technických hmot, *Studijní podklady*. PřF – MU Brno 1966.
- [4] JELÍNEK, Petr. Slévárenství, *Skripta*. VŠB Ostrava 1992.
- [5] JENČOVSKÝ, Miloš. Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi. *Diplomová práce 2006*. KSP-FS, TU v Liberci
- [6] KRÝSLOVÁ, Stanislava. Sledování slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků, *Doktorská práce*. KSP-FS, TU v Liberci 2008.
- [7] MACHUTA, Jiří. Posouzení plynatosti vybraných slévárenských směsí, *Diplomová Práce TUL*, Liberec 2007.
- [8] NOVÁ, Iva. Teorie slévání I, *Skripta KSP-FS*, TU v Liberci 2006, ISBN 80-7372-149-X.
- [9] ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin, *Skripta*. VUT Brno 2004, ISBN 80 – 214-2790-6.
- [10] VETIŠKA, Aleš. Teoretické základy slévárenské technologie, *Studijní podklady*. Praha SNTL 1974.
- [11] MACHUTA, Jiří. Sledování vlastností formovacích a jádrových směsí během jejich tepelného namáhání, *Disertační práce*. KSP-FS, TU v Liberci 2010.

## Seznam obrázků

Obr. 1-1 Schéma rozdělení slévárenských pojiv, podle [2] .....	17
Obr. 1-2 Srovnání průběhu hydratace a nárůstu pevnosti u $\alpha$ a $\beta$ sádry dle [3] .....	23
Obr. 1-3 Pohled na polovinu modelového zařízení.....	27
Obr. 2-1 Schéma zařízení na sledování dilatačních změn .....	34
Obr. 2-2 Zařízení pro sledování dilatačních změn formovacích a jádrových směsí ..	35
Obr. 2-3 Křemenná trubice .....	36
Obr. 2-4 USB Sběrnice Omega s termočlánky Daq 56 .....	36
Obr. 2-5 Pracoviště na měření dilatace sádrových směsí .....	36
Obr. 2-6 Váha Radwag WPS 4000/C/2 .....	37
Obr. 2-7 Digitální posuvné měřítko Mitutoyo CD-15 .....	37
Obr. 2-8 Použitá formička pro výrobu vzorků pro měření dilatace .....	37
Obr. 2-9 Vzorky na kterých byla sledována dilatace.....	38
Obr. 2-10 Sádrový vzorek v křemenné trubici těsně po vyjmutí z pece.....	39
Obr. 2-11 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800°C při poměru voda- sádra 75:25.....	42
Obr. 2-12 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 800°C při poměru voda- sádra 50:50.....	42
Obr. 2-13 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 1000°C při poměru voda- sádra 75:25.....	43
Obr. 2-14 Závislost průměrné dilatace na teplotě vzorku při šokovém ohřevu na 1000°C při poměru voda- sádra 50:50.....	43
Obr. 2-15 Zařízení na měření plynatosti.....	46
Obr. 2-16 Sestava pracoviště.....	47
Obr. 2-17 Kalibrační křivka zjištěná pomocí rozkladu $\text{CaCO}_3$ .....	48
Obr. 2-18 Váha Leco EB25.....	49
Obr. 2-19 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C .....	51
Obr. 2-20 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C .....	52
Obr. 2-21 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 800 °C.....	53
Obr. 2-22 Průměrné hodnoty plynatosti sádry s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 800 °C.....	54

## Seznam tabulek

Tab. 2-1 Podmínky měření jednotlivých směsí.....	39
Tab. 2-2 Ukázka naměřených a vypočítaných hodnot z jednoho experimentu z jednoho měření dilatace .....	40
Tab. 2-3 Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti sádry při postupném ohřevu na 1000 °C .....	44
Tab. 2-4 Hodnoty součinitele teplotních roztažností.....	45
Tab. 2-5 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C .....	51
Tab. 2-6 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 1000 °C .....	52
Tab. 2-7 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 75% a sádry 25% v závislosti na čase při teplotě 800 °C .....	53
Tab. 2-8 Průměrné hodnoty plynatosti s poměrem vody 50% a sádry 50% v závislosti na čase při teplotě 800 °C .....	54

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000sb. O právu autorském, zejména § 60- školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci(TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

27.5.2011

.....  
Čeněk Faifr